



**Nuno Rafael Abrantes Santiago**

**Metodologias para avaliação do  
desempenho e previsão de avarias em  
turbinas eólicas utilizando a curva de  
potência do fabricante**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energias  
Renováveis – Conversão Eléctrica e Utilização Sustentáveis, pela  
Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciência e Tecnologia

Orientador: Doutor João Miguel Murta Pina  
Co-orientador: Doutor João Francisco Alves Martins

Júri:

Presidente:	Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto
Arguente:	Doutor Daniel Cardoso Vaz
Vogal(ais):	Doutor João Miguel Murta Pina
	Doutor João Francisco Alves Martins



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro de 2012**

# **Metodologias para avaliação do desempenho e previsão de avarias em turbinas eólicas utilizando a curva de potência do fabricante**

Copyright em nome de Nuno Rafael Abrantes Santiago, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## **Agradecimentos**

À minha mulher, Cristina que esteve sempre presente. Sem o seu amor, carinho, ajuda e incentivo este objetivo não teria existido.

Aos meus orientadores Prof. João Murta Pina e Prof. João Martins pelo apoio disponibilizado, bem como todos as sugestões, sem as quais este trabalho não teria sido realizado.

Aos meus pais, a quem devo muito e me inculcaram valores fundamentais como trabalho, paciência, persistência, ética, respeito e honestidade, que me orientam na vida pessoal e profissional a ser um Homem melhor e respeitador.

Aos meus irmãos, André e Sandra que estão sempre presentes em pensamento.

À minha sobrinha Catarina e ao meu sobrinho Davide que entretanto trouxeram novas alegrias ao mundo.

Aos meus amigos e colegas do curso, que foram muito importantes nesta fase da vida, sempre prontos a ajudar e a dar uma boa conversa apoio.

Aos Engenheiros da Iberwind pelos esclarecimentos técnicos e pelos dados reais fornecidos, sem os quais não teria sido possível realizar este trabalho.

E finalmente a todos os que se preocupam com o ambiente, com a sustentabilidade, com a humanidade e com as energias renováveis, que lutam para se ter pelo menos esperança num mundo melhor, mais harmonioso e respeitador da vida.



## Sumário

A manutenção de turbinas eólicas (TEs) terá uma importância crescente nas próximas décadas e é fundamental que a gestão da manutenção dos parques eólicos (PEs) invista na manutenção preditiva, pois só assim é que se podem otimizar os ativos eólicos, tornar a tecnologia eólica mais competitiva e atrair cada vez mais investimento.

O objetivo deste estudo foi criar metodologias para avaliar o desempenho e prever avarias em TEs, usando como *inputs* a curva de potência do fabricante, os dados *SCADA* e os dados históricos das intervenções das equipas de manutenção, para utilizar na manutenção preditiva com a finalidade de otimizar os ativos eólicos e reduzir os custos de operação e manutenção dos PEs.

Foram executados quatro programas em MATLAB a partir das seis metodologias propostas, um para determinar a curva de potência de referência teórica do fabricante, metodologia 1, um para avaliar o funcionamento de TEs, metodologia 2 e prever o desempenho de TEs, metodologias 3 e 4, dois para prever a eficiência de TEs, metodologias 5 e 6.

A função usada em MATLAB para aproximar e descrever analiticamente a curva de potência de referência do fabricante foi o polinómio *spline*, as métricas usadas foram as médias e os desvios padrão do desempenho e da eficiência por semana (modelo anual/semanal) ou por dia (modelo mensal/diário) e as metodologias para prever tiveram como base a estimação da tendência linear dessas métricas.

Foram aplicadas as metodologias 1 e 2 para determinar as curvas de potência de referência e avaliar o funcionamento de dois PEs, o PE1 com cinco e o PE2 com oito TEs Nordex N90 durante o período de quatro anos de 2008 a 2011.

Foram testadas as metodologias 3, 4, 5 e 6 para prever as avarias em TEs, para os períodos anteriores a algumas avarias graves das oito TEs do PE2. Não foi possível prever as avarias nas caixas multiplicadoras da TE1, TE2 e TE5, no inversor do sistema *Pitch 2* da TE3, nas pás da TE7, no rolamento de suporte do veio de alta rotação da TE4, em alguns rolamentos da caixa multiplicadora da TE4, na caixa redutora do sistema *Yaw* da TE1 e no motor do sistema *Yaw* da TE7.

**Palavras-Chave:** energia eólica, turbinas eólicas, manutenção preditiva, curva potência, eficiência, desempenho



## Abstract

The maintenance of wind turbines (WTs) will become increasingly important in the coming decades and it is essential that the maintenance management of wind farms (WFs) invests in predictive maintenance, because only then the wind assets can be optimized, making wind technology more competitive and attracting ever more investment.

The aim of this study was to develop methodologies for performance assessment and prediction of WTs faults, considering as inputs the manufacturer's theoretical reference power curve, *SCADA* data and historical data of maintenance teams' interventions, for use in predictive maintenance in order to optimize wind assets and reduce operation and maintenance costs of WFs.

Four programs were developed in MATLAB, from the six proposed methodologies: one to determine the manufacturer's theoretical reference power curve, methodology 1, one to evaluate the operation of WTs, methodology 2, and predict the performance of WTs, methodologies 3 and 4, and two for predicting the efficiency of WTs, methodologies 5 and 6.

The MATLAB function used to approximate and describe analytically the manufacturer's reference power curve was the polynomial *spline*, the metrics used were the mean and the standard deviation of performance and efficiency per week (annual/weekly model) or per day (monthly/daily model) and the predictive methodologies were based on the linear trend estimation of these metrics.

Methodologies 1 and 2 were applied to determine reference power curves and evaluate the performance of two WFs, the WF1 with five, and WF2 with eight Nordex N90 WTs, during the four-year period from 2008 to 2011.

Methodologies 3, 4, 5 and 6 were tested to predict faults in WTs for periods prior to some serious malfunctions of the eight WTs of the WF2. It was not possible to predict failures in the gearboxes of the WT1, WT2 and WT5, in the Pitch 2 system's inverter of the WT3, in the blades of the WT7, in the high-speed shaft bearing support of the WT4, in some gearbox bearings of the WT4, in the Yaw system's gearbox of the WT1 and in the Yaw system's motor of the WT7.

Keywords: wind energy, wind turbines, predictive maintenance, power curve, efficiency, performance





## Simbologia

A	Área varrida pelo rotor da TE ( $m^2$ )
AnaliTE_CEP_31dias	Programa para analisar os dados reais de 31 dias de TEs
AnaliTE_CEP_52semanas	Programa para analisar os dados reais de 52 semanas de TEs
AnaliTE2	Programa para análise de TEs
Calcular_M_Vol_Ref_Curva_Pot_Ref	Programa para calcular a MV de referência e a curva potência de referência de TEs
Cp	Coefficiente de potência da TE
<i>CMS</i>	<i>Condition monitoring system</i>
D	Disponibilidade
DES <sub>(10min)</sub>	Desempenho médio da potência da TE calculado para um período de 10 minutos (W)
DES <sub>(hora)</sub>	Desempenho médio da potência da TE calculado para um período de uma hora (W)
DES <sub>(dia)</sub>	Desempenho médio da potência da TE calculado para um período de um dia (W)
DES <sub>(semana)</sub>	Desempenho médio da potência da TE calculado para um período de uma semana (W)
DES <sub>(mes)</sub>	Desempenho médio da potência da TE calculado para um período de um mês (W)
DES <sub>(ano)</sub>	Desempenho médio da potência da TE calculado para um período de um ano (W)
DES <sub>dir(ano)</sub>	Desempenho médio anual da potência da TE por cada direção do vento para um período de um ano (W)
DES <sub>energia(hora)</sub>	Desempenho energético da TE calculado para um período de uma hora (Wh)
DES <sub>energia(dia)</sub>	Desempenho energético da TE calculado para um período de um dia (Wh)
DES <sub>energia(semana)</sub>	Desempenho energético da TE calculado para um período de uma semana (Wh)
DES <sub>energia(mes)</sub>	Desempenho energético da TE calculado para um período de um mês (Wh)
DES <sub>energia(ano)</sub>	Desempenho energético da TE calculado para um período de um ano (Wh)
DES <sub>energia<sub>dir</sub>(ano)</sub>	Desempenho energético anual da TE por cada direção do vento para um período de um ano (Wh)

$DES_{\text{energiaVi(ano)}}$	Desempenho energético anual da TE por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de um ano (Wh)
$\sigma_{DES(\text{hora})}$	Desvio padrão do desempenho da TE calculado para um período de uma hora (W)
$\sigma_{DES(\text{dia})}$	Desvio padrão do desempenho da TE calculado para um período de um dia (W)
$\sigma_{DES(\text{semana})}$	Desvio padrão do desempenho da TE calculado para um período de uma semana (W)
$\sigma_{DESVi(\text{ano})}$	Desvio padrão do desempenho da TE calculado por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de um ano (W)
$\sigma$ ou DP	Desvio padrão - <i>STD (standard deviation)</i>
$Dir_{\text{Vento}(10\text{min})}$	Direção do vento medida durante 10 minutos ( $^{\circ}$ ) - ( $30^{\circ}$ , $60^{\circ}$ , $90^{\circ}$ , $120^{\circ}$ , $150^{\circ}$ , $180^{\circ}$ , $210^{\circ}$ , $240^{\circ}$ , $270^{\circ}$ , $300^{\circ}$ , $330^{\circ}$ , $360^{\circ}$ )
Eq	Equação
$Er_{(10\text{min})}$	Energia real produzida pela TE para um período de 10 minutos (Wh)
$Er_{(\text{mes})}$	Energia real produzida pela TE para um período de um mês (Wh)
$Er_{(\text{ano})}$	Energia real produzida pela TE para um período de um ano (Wh)
$Er_{\text{dir}(\text{ano})}$	Energia real produzida pela TE para uma direção para um período de um ano (Wh)
$Er_{Vi(\text{ano})}$	Energia real produzida pela TE por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de um ano (Wh)
$Et_{(10\text{min})}$	Energia teórica produzida pela TE para um período de 10 minutos (Wh)
$Et_{(\text{mes})}$	Energia teórica produzida pela TE para um período de um mês (Wh)
$Et_{(\text{ano})}$	Energia teórica produzida pela TE para um período de um ano (Wh)
$Et_{\text{dir}(\text{ano})}$	Energia teórica produzida pela TE para uma direção para um período de um ano (Wh)
$Et_{Vi(\text{ano})}$	Energia teórica produzida pela TE por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de um ano (Wh)
$EVn_{(10\text{min})}$	Energia disponível no vento normalizada para um período de 10 minutos (Wh)
$EVn_{(\text{mes})}$	Energia disponível no vento normalizada para um período de um mês (Wh)
$EVn_{(\text{ano})}$	Energia disponível no vento normalizada para um período de um ano (Wh)
$EVn_{\text{dir}(\text{ano})}$	Energia disponível no vento normalizada para uma direção para um período de um ano (Wh)
$EVn_{Vi(\text{ano})}$	Energia disponível no vento normalizada por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de um ano (Wh)

<i>EPRI</i>	<i>Electric Power Research Institute</i>
<i>EWEA</i>	<i>European Wind Energy Association</i>
$FU_{(10min)}$	Fator de utilização da TE para um período de 10 minutos (%)
$FU_{(mes)}$	Fator de utilização da TE para um período de um mês (%)
$FU_{(ano)}$	Fator de utilização da TE para um período de um ano (%)
$FU_{dir(ano)}$	Fator de utilização da TE para uma direção para um período de um ano (%)
$horas_{(mes)}$	Horas totais de um determinado mês (horas)
$horas_{(direcao)}$	Horas totais de uma determinada direção (horas)
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
MV	Massa volúmica ( $kg/m^3$ )
<i>MTBF</i>	<i>Mean time between failures</i>
<i>MTTR</i>	<i>Mean time to repair</i>
<i>MWT</i>	<i>Mean waiting time</i>
normalizada	Com velocidade do vento normalizada
<i>NWCC</i>	<i>National Wind Coordinating Committee</i>
PE	Parque eólico
Pelect	Potência elétrica à saída da TE (W)
<i>PLC</i>	Controlador lógico programável
$P_{nominal}$	Potência nominal da TE (W)
$pr_{(10min)}$	Pressão média do ar medida para um período de 10 minutos (mbar)
$P_{vento}$	Potência disponível no vento (W)
$PVn_{(10min)}$	Potência média disponível no vento para um período de 10 minutos (W)
$PVn_{(mes)}$	Potência média disponível no vento para um período de um mês (W)
$PVn_{(ano)}$	Potência média disponível no vento para um período de um ano (W)
$PVn_{dir(ano)}$	Potência média disponível no vento para uma direção para um período de um ano (W)
$Pr_{(10min)}$	Potência média real da TE medida para um período de 10 minutos (W)
$Pr_{(dia)}$	Potência média real da TE para um período de um dia (W)
$Pr_{(semana)}$	Potência média real da TE para um período de uma semana (W)
$Pr_{Vi(10min)}$	Potência média real da TE por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de 10 minutos (W)
$Pr_{Vi(dia)}$	Potência média real da TE por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de um dia (W)

$Pr_{Vi(ano)}$	Potência média real da TE por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de um ano (W)
$Pr_{Vi(semana)}$	Potência média real da TE por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de uma semana (W)
$PROD_{(10min)}$	Produtividade da TE para um período de 10 minutos (Wh/m <sup>2</sup> )
$PROD_{(mes)}$	Produtividade da TE para um período de um mês (Wh/m <sup>2</sup> )
$PROD_{(ano)}$	Produtividade da TE para um período de um ano (Wh/m <sup>2</sup> )
$PROD_{dir(ano)}$	Produtividade da TE para uma direção para um período de um ano (Wh/m <sup>2</sup> )
$Pt_{(10min)}$	Potência média teórica da TE para um período de 10 minutos (W)
$Pt_{(dia)}$	Potência média teórica da TE para um período de um dia (W)
$Pt_{(semana)}$	Potência média teórica da TE para um período de uma semana (W)
$Pt_{Vi(10min)}$	Potência média teórica da TE por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de 10 minutos (W)
$Pt_{Vi(dia)}$	Potência média teórica da TE por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de um dia (W)
$Pt_{Vi(semana)}$	Potência média teórica da TE por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de uma semana (W)
$Pt_{Vi(ano)}$	Potência média teórica da TE por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de um ano (W)
<i>RBM</i>	<i>Risc based maintenance</i>
<i>RCM</i>	<i>Reliability centered maintenance</i>
$REND_{(10min)}$	Rendimento da TE para um período de 10 minutos (%)
$REND_{(mes)}$	Rendimento da TE para um período de um mês (%)
$REND_{(ano)}$	Rendimento da TE para um período de um ano (%)
$REND_{dir(ano)}$	Rendimento da TE para uma direção para um período de um ano (%)
<i>RMP</i>	<i>Risk management process</i>
RPM	Rotações por minuto
Ro	Constante específica do ar seco = 287,05 J/ (Kg.K)
<i>SCADA</i>	<i>Supervisory control and data acquisition</i>
$TC_{(10min)}$	Temperatura média do ar medida para um período de 10 minutos (°C)
$TK_{(10min)}$	Temperatura média do ar medida para um período de 10 minutos (K)
TE	Turbina eólica

<i>TPM</i>	<i>Total productive maintenance</i>
$v$	Velocidade do vento (m/s)
$V_{(10min)}$	Velocidade média do ar medida para um período de 10 minutos (m/s)
$V_{(ano)}$	Velocidade média do ar medida para um período de um ano (m/s)
$V_{cut\_in}$	<i>Cut-in wind speed (m/s)</i>
$V_{cut\_out}$	<i>Cut-out wind speed (m/s)</i>
$V_n$	Velocidade do vento normalizada (m/s)
$V_{n(10min)}$	Velocidade do vento média normalizada para um período de 10 minutos (m/s)
$V_{n(mes)}$	Velocidade do vento média normalizada para um período de um mês (m/s)
$V_{n(ano)}$	Velocidade do vento média normalizada para um período de um ano (m/s)
$V_{n(dir(ano))}$	Velocidade do vento média normalizada, por direção para um período de um ano (m/s)
$V_{Nom}$	Velocidade nominal (m/s)
<i>UPS</i>	<i>Uninterruptible power supply</i>
<i>WWEA</i>	<i>World Wind Energy Association</i>
$Y(i)$	Valores “futuros” das médias ou dos desvios padrão semanais ou diários do desempenho ou da eficiência
$Y(57)$	Valor “futuro” da média ou do desvio padrão semanal do desempenho ou da eficiência para a semana 57, isto é, para daqui a 5 semanas, sendo considerada a semana 52 a última semana
$Y(38)$	Valor “futuro” da média ou do desvio padrão diário do desempenho ou da eficiência para o dia 38, isto é, para daqui a 7 dias, sendo considerada o dia 31 o último dia
$\lambda$	Taxa de avarias
$\rho$	MV do ar (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{(10min)}$	MV média do ar para um período de 10 minutos (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{(mes)}$	MV média do ar para um período de um mês (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{(ano)}$	MV média do ar para um período de um ano (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{dir(ano)}$	MV média do ar para uma direção para um período de um ano (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{(media)}$	MV média do ar (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{(ref)}$	MV de referência do ar (kg/m <sup>3</sup> )
$\eta_{(10min)}$	Eficiência média da TE calculada para um período de 10 minutos (%)
$\eta_{(hora)}$	Eficiência média da TE calculada para um período de uma hora (%)

$\eta_{(\text{dia})}$	Eficiência média da TE calculada para um período de um dia (%)
$\eta_{(\text{semana})}$	Eficiência média da TE calculada para um período de uma semana (%)
$\eta_{(\text{mes})}$	Eficiência média da TE calculada para um período de um mês (%)
$\eta_{(\text{ano})}$	Eficiência média da TE calculada para um período de um ano (%)
$\eta_{\text{dir}(\text{ano})}$	Eficiência média da TE calculada para uma direção para um período de um ano (%)
$\eta_{V_i(\text{dia})}$	Eficiência média da TE calculada por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de um dia (%)
$\eta_{V_i(\text{semana})}$	Eficiência média da TE calculada por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de uma semana (%)
$\eta_{V_i(\text{ano})}$	Eficiência média da TE calculada por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento para um período de um ano (%)

# Índice

<b>Capítulo 1 - Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Contribuições originais .....	2
1.4. Estrutura da dissertação.....	2
<b>Capítulo 2 - Revisão da literatura.....</b>	<b>5</b>
2.1. Energia eólica e tecnologia das TEs .....	5
2.1.1. Energia eólica.....	5
2.1.2. Principais sistemas e componentes das TEs .....	5
2.1.3. Potência eólica.....	7
2.1.4. Curva de potência das TEs.....	8
2.1.5. Expressão analítica para a curva de potência teórica do fabricante.....	9
2.1.6. Normalização da velocidade do vento.....	12
2.1.7. Principais sistemas e componentes das TEs Nordex N90 .....	14
2.2. Manutenção de TEs.....	17
2.2.1. Principais conceitos da manutenção – manutenção, fiabilidade, disponibilidade, manutibilidade, <i>MTBF</i> , <i>MTTR</i> e taxa de avarias .....	20
2.2.2. Principais tipos de manutenção – corretiva e preventiva.....	22
2.2.3. Manutenção condicionada e preditiva de TEs – vantagens e desvantagens.....	23
2.2.4. Métodos de monitorização e variáveis de controlo .....	24
2.2.5. Otimização da manutenção – sistema <i>SCADA</i> .....	26
2.2.6. Principais avarias em TEs.....	28
2.3. Análise estatística dos dados .....	29
2.3.1. Variável de controlo - desempenho.....	29
2.3.2. Variável de controlo - eficiência.....	30
2.3.3. Métricas de análise usadas nas metodologias.....	30

2.3.4. Métrica de localização – média (por hora, dia e semana) .....	30
2.3.5. Métrica de dispersão – desvio padrão (por hora, dia e semana) .....	31
2.3.6. Os métodos de previsão e análise de séries temporais .....	31
2.3.7. Filtros de dados para TEs.....	32
<b>Capítulo 3 - Metodologias para análise do desempenho e previsão de avarias em TE utilizando a curva de potência do fabricante.....</b>	<b>33</b>
3.1. Metodologia 1 - calcular $\rho_{(ref)}$ e a curva de potência de referência de uma TE.....	33
3.2. Metodologia 2 – calcular parâmetros de funcionamento da TE (por ano, por mês, por direção e em função da velocidade do vento) para um período de um ano .....	34
3.3. Metodologia 3 – calcular o $DES_{(semana)}$ e o $\sigma DES_{(semana)}$ da TE das últimas 52 semanas e prever as próximas 5 semanas (sem filtros) .....	43
3.4. Metodologia 4 – calcular o $DES_{(dia)}$ e o $\sigma DES_{(dia)}$ da TE dos últimos 31 dias e prever os próximos 7 dias (sem filtros).....	44
3.5. Metodologia 5 - calcular a $\eta_{Vi(semana)}$ da TE das últimas 52 semanas e prever as próximas 5 semanas, para quatro intervalos da velocidade do vento (com filtros) .....	46
3.6. Metodologia 6 – calcular a $\eta_{Vi(dia)}$ da TE nos últimos 31 dias e prever os próximos 7 dias, para quatro intervalos da velocidade do vento (com filtros) .....	48
<b>Capítulo 4 – Descrição dos programas criados em MATLAB .....</b>	<b>51</b>
4.1. Programa Calcular_M_Vol_Ref_Curva_Pot_Ref.....	51
4.2. Programa AnaliTE2 (sem filtros).....	52
4.3. Programas AnaliTE_CEP_52semanas e AnaliTE_CEP_31dias (com filtros).....	64
<b>Capítulo 5 – Análise de dados reais de TE.....</b>	<b>71</b>
5.1. Aplicação da metodologia 1 aos dois PEs .....	71
5.2. Aplicação da metodologia 2 aos dois PEs .....	72
5.3. Aplicação das metodologias 3 e 4 .....	78
5.4. Aplicação das metodologias 5 e 6 .....	84
<b>Capítulo 6 - Conclusões e trabalhos futuros.....</b>	<b>99</b>
6.1. Conclusões .....	100
6.2. Trabalhos futuros .....	101
<b>Bibliografia.....</b>	<b>103</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>107</b>



Anexo A – Curvas de potência da TE Nordex N90 para diferentes MV do ar .....	107
Anexo B – Procedimento 3.1 para filtrar os dados meteorológicos da pressão e da temperatura .....	108
Anexo C – Procedimento 3.2 para determinar a $\rho(\text{ref})$ e a curva de potência de referência das TEs Nordex N90.....	109
Anexo D – Procedimento 3.3 para determinar a potência teórica debitada pela TE .....	110
Anexo E – Procedimento 3.4 para dividir a matriz dos <i>inputs</i> dum ano em 12 matrizes, uma por cada direção .....	111
Anexo F – Procedimento 3.5 para dividir a matriz dos <i>inputs</i> dum ano em 29 matrizes por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento.....	112
Anexo G – Procedimento 3.6 para dividir a matriz dos <i>inputs</i> dum ano em 52 matrizes semanais e determinar as médias e os desvios padrão semanais do desempenho da TE.....	113
Anexo H – Procedimento 3.8 para dividir a matriz dos <i>inputs</i> dum mês em 31 matrizes diárias e determinar as médias e os desvios padrão do desempenho diário da TE.....	113
Anexo I – Procedimento 3.7 para prever a variação da média e do desvio padrão do desempenho para as próximas 5 semanas.....	114
Anexo J – Procedimento 3.9 - filtrar os dados anormais da potência real.....	115
Anexo L – Procedimento 3.10 – obter as 4 matrizes com os dados de cada intervalo de velocidade do vento $v=6$ ; $v=8$ ; $v=10$ ; $v=12$ m/s .....	115
Anexo M – Ficheiro das características e da curva de potência de referência da TE Nordex_2300_90_80_1_015 ( $\rho(\text{ref}) = 1,015 \text{ kg/m}^3$ ).....	116
Anexo N – Tabela dos resultados anuais de cada TE do PE1 usando a metodologia 2 .....	118
Anexo O – Tabela dos resultados anuais de cada TE do PE2 usando a metodologia 2 .....	119
Anexo P – Registo das intervenções efetuadas às oito TEs do PE2 de 01/01/2008 a 31/05/2012 .....	121



## Índice de figuras

Figura 2.1 – Curva de potência de uma TE de 2 MW da Vestas .....	6
Figura 2.2 – Pontos da zona II de potência fornecidos pelo fabricante e curvas de potência aproximadas por polinómios de grau 3, 4, 5 e 6 e o polinómio <i>spline</i> .....	9
Figura 2.3 – Curvas de potência da TE Nordex N90 para diferentes MV do ar .....	10
Figura 2.4 – Esquema de uma TE de eixo horizontal (Castro, 2011) .....	13
Figura 2.5 – Vista geral da cabina de uma TE Nordex N90 (Nordex, 2004) .....	15
Figura 2.6 – Evolução da potência eólica instalada na Europa ( WWEA, 2012) .....	18
Figura 2.7 – Evolução da potência eólica instalada em Portugal ( WWEA, 2012) .....	18
Figura 2.8 – Previsão da potência e produção eólica em 2020 na Europa e em Portugal (EWEA, 2011) ....	19
Figura 2.9 – Número de TEs e potência unitária média em Portugal (INEGI, 2009) .....	19
Figura 2.10 - Distribuição dos custos do ciclo de vida dos PEs (EDP, 2010) .....	20
Figura 2.11 - Inspeção termográfica de ligações elétricas e de um grupo de fusíveis com pontos quentes (fonte: “ <i>Instalaciones Solares Fotovoltaicas</i> ”, Miguel Moro Vallina, Paraninfo) .....	25
Figura 2.12 – Método de deteção e previsão de anomalias através das variáveis desempenho e eficiência de TEs (Hameed et.al, 2006) .....	26
Figura 2.13 - Conceito de otimização de manutenção (EDP, 2010) .....	27
Figura 2.14 - Transmissão por satélite dos dados do SCADA (SKF, 2012) .....	27
Figura 2.15 – Tempo de reparação por falha (Brandao at.al., 2008) .....	29
Figura 3.1 - Metodologia 1 para calcular $\rho_{(ref)}$ e a curva de potência de referência de uma TE .....	33
Figura 3.2 - Metodologia 2 para calcular alguns parâmetros de funcionamento da TE (por ano, por mês, por direcção e em função da velocidade do vento) para um período de um ano (sem filtros) .....	35
Figura 3.3 – Metodologia 3 para analisar o $DES_{(semana)}$ e o $\sigma DES_{(semana)}$ da TE das últimas 52 semanas e prever as próximas 5 semanas (sem filtros) .....	43
Figura 3.4 – Metodologia 4 para analisar o $DES_{(dia)}$ e o $\sigma DES_{(dia)}$ da TE dos últimos 31 dias e prever os próximos 7 dias (sem filtros) .....	45
Figura 3.5 – Metodologia 5 para analisar a $\eta Vi_{(semana)}$ da TE nas últimas 52 semanas e prever as próximas 5 semanas (com filtros), para os intervalos da velocidade do vento $v=6$ ; $v=8$ ; $v=10$ ; $v=12$ m/s .....	47
Figura 3.6 – Metodologia 6 para analisar a $\eta Vi_{(dia)}$ da TE nos últimos 31 dias e prever os próximos 7 dias (com filtros), para os intervalos da velocidade do vento $v=6$ ; $v=8$ ; $v=10$ ; $v=12$ m/s .....	49
Figura 4.1 - Figura principal inicial do programa Calcular_M_Vol_Ref_Curva_Pot_Ref .....	51
Figura 4.2 - Figura principal final do programa Calcular_M_Vol_Ref_Curva_Pot_Ref .....	52
Figura 4.3 - Figura principal inicial do programa AnalíTE2 .....	53
Figura 4.4 - Figura da tabela O1 dos parâmetros de saída anuais .....	54
Figura 4.5 - Figura da tabela O2 dos parâmetros de saída por mês .....	55
Figura 4.6 - Figura da tabela O3 dos parâmetros anuais calculados a partir dos parâmetros por mês .....	55
Figura 4.7 - Figura da tabela O4 dos parâmetros de saída por direcção .....	55
Figura 4.8 - Figura da tabela O5 dos parâmetros anuais calculados a partir dos parâmetros por direcção .....	55
Figura 4.9 - Gráfico do $DES_{energia(mes)}$ .....	56
Figura 4.10 - Gráfico da $\eta_{(mes)}$ .....	56
Figura 4.11 - Gráfico das $E_{vn(mes)}$ , $E_r(mes)$ e $E_t(mes)$ .....	57
Figura 4.12 - Gráfico do $REND_{(mes)}$ .....	57

Figura 4.13 - Gráfico do $FU_{(mes)}$ .....	57
Figura 4.14 - Gráfico do $DES_{energia_{dir(ano)}}$ .....	58
Figura 4.15 - Gráfico da $\eta_{dir(ano)}$ .....	58
Figura 4.16 - Gráfico das $Ev_{n_{dir(ano)}}$ , $Er_{dir(ano)}$ e $Et_{dir(ano)}$ .....	58
Figura 4.17 - Gráfico do $REND_{dir(ano)}$ .....	59
Figura 4.18 - Gráfico do $FU_{dir(ano)}$ .....	59
Figura 4.19 - Gráfico do $DES_{energia_{vi(ano)}}$ .....	59
Figura 4.20 - Gráfico da $\eta_{Vi(ano)}$ .....	60
Figura 4.21 - Gráfico das $Ev_{n_{Vi(ano)}}$ , $Er_{Vi(ano)}$ e $Et_{Vi(ano)}$ .....	60
Figura 4.22 - Gráfico da variação do $DES_{(semana)}$ ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas .....	61
Figura 4.23 - Gráfico da variação do $\sigma DES_{(semana)}$ ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas .....	62
Figura 4.24 - Gráfico da variação do $DES_{(dia)}$ ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias .....	62
Figura 4.25 - Gráfico da variação do $\sigma DES_{(dia)}$ ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias .....	63
Figura 4.26 - Figura principal final do programa AnalíTE2 .....	63
Figura 4.27 - Figura principal inicial do programa AnalíTE_CEP_52semanas .....	64
Figura 4.28 - Gráfico da $Pr_{Vi(10min)}$ da TE, sem filtros .....	65
Figura 4.29 - Gráfico da $\eta_{Vi(ano)}$ da TE, sem filtro .....	65
Figura 4.30 - Figura da tabela O2 do número de dados filtrados .....	65
Figura 4.31 - Figura da tabela O3 das $Pr_{Vi(ano)}$ , $Pt_{Vi(ano)}$ , $\sigma DES_{Vi(ano)}$ e $\eta_{Vi(ano)}$ , com e sem filtros .....	66
Figura 4.32 - Gráfico da $Pr_{Vi(10min)}$ da TE, com filtros e as curvas de potência do fabricante para $\rho(ref)=1,015 \text{ Kg/m}^3$ e $\rho=1,225 \text{ Kg/m}^3$ .....	66
Figura 4.33 - Gráfico da $\eta_{Vi(ano)}$ da TE, com filtros .....	67
Figura 4.34 - Gráfico da curva de potência real, sem filtro, curva de potência real, com filtros e curva de potência teórica do fabricante para a MV do ar de referência (neste caso $\rho(ref)=1,015 \text{ Kg/m}^3$ ) .....	67
Figura 4.35 - Figura da tabela O4 da $\eta_{Vi(semana)}$ da TE nas últimas 52 semanas, com filtros .....	68
Figura 4.36 - Gráfico da variação da $\eta_{Vi(semana)}$ da TE ao longo das últimas 52 semanas, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de 12 – [11,75:12,25] m/s .....	68
Figura 4.37 - Gráfico da variação da $\eta_{Vi(semana)}$ da TE das últimas 52 semanas e previsão das próximas 5 semanas, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de 12 – [11,75:12,25] m/s .....	68
Figura 4.38 - Figura principal final do programa AnalíTE_CEP_31dias .....	69
Figura 4.39 - Gráfico da variação da $\eta_{Vi(dia)}$ da TE ao longo dos últimos 31 dias, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de 12 – [11,75:12,25] m/s. ....	69
Figura 4.40 - Gráfico da variação da $\eta_{Vi(dia)}$ da TE nos últimos 31 dias e previsão dos próximos 5 dias, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de 12 – [11,75:12,25] m/s. ....	70
Figura 5.1 - Gráfico das curvas de potência da TE Nordex N90 para diferentes MV do ar .....	72
Figura 5.2 - Gráfico das $EV_{n(mes)}$ , $Er_{(mes)}$ e $Et_{(mes)}$ da TE5 do PE2 no ano de 2009 .....	75
Figura 5.3 - Gráfico do $DES_{energia(mes)}$ da TE5 do PE2 no ano de 2009 .....	76

Figura 5.4 - Gráfico da $\eta_{(\text{mes})}$ da TE5 do PE2 no ano de 2009 .....	76
Figura 5.5 - Gráfico da $\eta_{\text{dir}(\text{ano})}$ da TE5 do PE2 no ano de 2009 .....	77
Figura 5.6 - Gráfico das $EV_{\eta_{\text{Vi}(\text{ano})}}$ , $Er_{\eta_{\text{Vi}(\text{ano})}}$ e $Et_{\eta_{\text{Vi}(\text{ano})}}$ da TE5 do PE2 no ano de 2009 .....	77
Figura 5.7 - Gráfico do $DES_{\text{energia}_{\eta_{\text{Vi}(\text{ano})}}}$ da TE5 do PE2 no ano de 2009 .....	78
Figura 5.8 - Gráfico da $\eta_{\text{Vi}(\text{ano})}$ da TE5 do PE2 no ano de 2009 .....	78
Figura 5.9 – Gráfico da variação do $DES_{(\text{semana})}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da avaria na caixa multiplicadora na TE5 .....	80
Figura 5.10 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(\text{semana})}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da avaria na caixa multiplicadora na TE5 .....	80
Figura 5.11 – Gráfico da variação do $DES_{(\text{dia})}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da avaria na caixa multiplicadora na TE5 .....	82
Figura 5.12 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(\text{dia})}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da avaria na caixa multiplicadora na TE5 .....	82
Figura 5.13 - Gráfico da variação da $\eta_{\text{Vi}(\text{semana})}$ da TE5, das últimas 52 semanas e previsão das próximas 5 semanas, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de [5,75:6,25] m/s .....	84
Figura 5.14 - Gráfico da variação da $\eta_{\text{Vi}(\text{semana})}$ da TE5, das últimas 52 semanas e previsão das próximas 5 semanas, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de [7,75:8,25] m/s .....	85
Figura 5.15 - Gráfico da variação da $\eta_{\text{Vi}(\text{semana})}$ da TE5, das últimas 52 semanas e previsão das próximas 5 semanas, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de [9,75:10,25] m/s .....	85
Figura 5.16 - Gráfico da variação da $\eta_{\text{Vi}(\text{semana})}$ da TE5, das últimas 52 semanas e previsão das próximas 5 semanas, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de [11,75:12,25] m/s .....	85
Figura 5.17 – Gráfico da variação da $DES_{(\text{semana})}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição do inversor do sistema <i>Pitch 2</i> na TE3 .....	87
Figura 5.18 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(\text{semana})}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição do inversor do sistema <i>Pitch 2</i> na TE3 .....	87
Figura 5.19 – Gráfico da variação do $DES_{(\text{dia})}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição do inversor do sistema <i>Pitch 2</i> na TE3 .....	88
Figura 5.20 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(\text{dia})}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição do inversor do sistema <i>Pitch 2</i> na TE3 .....	88
Figura 5.21 – Gráfico da variação do $DES_{(\text{semana})}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da reparação das pás na TE7 .....	89
Figura 5.22 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(\text{semana})}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da reparação das pás na TE7 .....	89
Figura 5.23 – Gráfico da variação do $DES_{(\text{dia})}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da reparação das pás na TE7 .....	90
Figura 5.24 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(\text{dia})}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da reparação das pás na TE7 .....	90
Figura 5.25 – Gráfico da variação da $DES_{(\text{semana})}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição do rolamento de suporte do veio de alta rotação na TE4 .....	91
Figura 5.26 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(\text{semana})}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição do rolamento de suporte do veio de alta rotação na TE4 .....	91
Figura 5.27 – Gráfico da variação do $DES_{(\text{dia})}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição do rolamento de suporte do veio de alta rotação na TE4 .....	92

Figura 5.28 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição do rolamento de suporte do veio de alta rotação na TE4 .....	92
Figura 5.29 – Gráfico da variação da $DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora na TE4 .....	93
Figura 5.30 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora na TE4 .....	93
Figura 5.31 – Gráfico da variação do $DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora na TE4 .....	94
Figura 5.32 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora na TE4 .....	94
Figura 5.33 – Gráfico da variação da $DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição da caixa redutora do sistema <i>Yaw</i> na TE1 .....	95
Figura 5.34 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição da caixa redutora do sistema <i>Yaw</i> na TE1 ....	95
Figura 5.35 – Gráfico da variação do $DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição da caixa redutora do sistema <i>Yaw</i> na TE1 .....	96
Figura 5.36 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição da caixa redutora do sistema <i>Yaw</i> na TE1 .....	96
Figura 5.37 – Gráfico da variação da $DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição do motor do sistema <i>Yaw</i> na TE7 .....	97
Figura 5.38 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição do motor do sistema <i>Yaw</i> na TE7 .....	97
Figura 5.39 – Gráfico da variação do $DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição do motor do sistema <i>Yaw</i> na TE7 .....	98
Figura 5.40 – Gráfico da variação do $\sigma DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição do motor do sistema <i>Yaw</i> na TE7 .....	98

## Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Potência do fabricante e potência aproximada para os polinómios de grau 3, 4, 5 e 6	11
Tabela 2.2 – Diferença entre a potência do fabricante e a potência teórica aproximada para os polinómios de grau 3, 4, 5 e 6	11
Tabela 2.3 – Desvio padrão das diferenças de potência para os polinómios de grau 3, 4, 5 e 6	11
Tabela 2.4 - Evolução da capacidade eólica no Mundo (WWEA, 2012)	17
Tabela 3.1 – Equações para o cálculo da MV média do ar ( $\rho$ – Kg/m <sup>3</sup> )	36
Tabela 3.2 – Equações para o cálculo da velocidade média do vento normalizada ( $V_n$ – m/s)	36
Tabela 3.3 – Equações para o cálculo da energia teórica produzida pela TE ( $E_t$ – MWh)	37
Tabela 3.4 – Equações para o cálculo da energia real produzida pela TE ( $E_r$ – MWh)	37
Tabela 3.5 – Equações para o cálculo da energia disponível no vento ( $E_{Vn}$ – MWh)	38
Tabela 3.6 – Equações para o cálculo do desempenho médio da TE (DES – kW)	38
Tabela 3.7 – Equações para o cálculo do desempenho energético da TE (DESenergia – MWh)	39
Tabela 3.8 – Equações para o cálculo da eficiência média da TE ( $\eta$ – %)	39
Tabela 3.9 – Equações para o cálculo do rendimento da TE (REND – %)	40
Tabela 3.10 – Equações para o cálculo do fator de utilização da TE (FU – %)	40
Tabela 3.11 – Equações para o cálculo da produtividade da TE (PROD – kWh/m <sup>2</sup> )	41
Tabela 3.12 – Equações para confirmar os parâmetros mensais com os parâmetros anuais	41
Tabela 3.13 – Equações para confirmar os parâmetros direcionais com os parâmetros anuais	42
Tabela 3.14 – Equações para confirmar os parâmetros em função da velocidade do vento com os parâmetros anuais	42
Tabela 5.1 – Tabela da $\rho_{(media)}$ e $\rho_{(ref)}$ de cada TE do PE1 para o período de 01/01/2008 até 31/05/2012	71
Tabela 5.2 – Tabela da $\rho_{(media)}$ e $\rho_{(ref)}$ de cada TE do PE2 para o período de 01/01/2008 até 31/05/2012	71
Tabela 5.3 – Tabela resumo dos parâmetros de saída anuais dos dois PEs	72
Tabela 5.4 – Tabela resumo dos parâmetros de saída anuais das cinco TE do PE1 e das oito TE do PE2	73
Tabela 5.5 – Tabela resumo dos parâmetros de saída anuais por TE do PE2	74
Tabela 5.6 – Tabela resumo dos parâmetros de saída anuais, por ano, das TE1 e TE5 do PE2	74
Tabela 5.7 – Tabela resumo dos parâmetros de saída mensais da TE5 do PE2 do ano 2009	75
Tabela 5.8 – Tabela resumo dos parâmetros de saída por direção da TE5 do PE2 do ano 2009	76
Tabela 5.9 – Tabela das intervenções efetuadas e registadas no PE2 de 01/2008 a 05/2012	79
Tabela 5.10 – Tabela das principais intervenções corretivas efetuadas no PE2 de 01/2008 a 05/2012	79
Tabela 5.11 – Tabela das inclinações das retas de tendência das médias e dos DP do desempenho semanal da TE5	80
Tabela 5.12 – Tabela das médias e dos DP do desempenho semanal da TE5 na última semana Y (52) e previsão para daqui a 5 semanas Y (57)	81
Tabela 5.13 – Tabela das inclinações das retas de tendência das médias e dos DP do desempenho diário da TE5	81
Tabela 5.14 – Tabela das médias e dos DP do desempenho diário da TE5 no último dia Y (31) e previsão para daqui a 7 dias Y (38)	81

Tabela 5.15 – Tabela dos valores e das inclinações das retas de tendência das médias e dos desvios padrão do desempenho por semana e por dia da TE5, TE1 e TE2 .....	83
Tabela 5.16 – Tabela dos valores e das inclinações das retas de tendência das médias da eficiência por semana e por dia da TE5, TE1 e TE2 .....	86



# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1. Motivação

As energias renováveis são cada vez mais importantes no combate às alterações climáticas e à poluição ambiental. Destas, a energia eólica é uma das mais desenvolvidas e mais utilizadas em todo o mundo. A exploração deste tipo de energia é cada vez maior e Portugal encontrava-se no fim de 2011 na décima posição na lista dos maiores produtores de energia eólica do mundo.

A energia eólica contribui para reforçar a diversificação das fontes primárias de energia, contribui para aumentar estruturalmente a segurança de abastecimento dos países, diminuir o risco da variação dos preços das *commodities* e melhorar os níveis de sustentabilidade, uma vez que se assiste a uma crescente escassez dos combustíveis fósseis e a um aumento do custo do barril de petróleo com tendência para aumentar cada vez mais.

A energia produzida nas TEs ajuda Portugal na redução das emissões de gases com efeito de estufa, no cumprimento dos tratados internacionais que assinou, como por exemplo o protocolo de Quioto e o protocolo pós-Quito e possibilita reduzir a dependência energética do país.

As atividades ligadas à indústria eólica, desde a produção, instalação e manutenção de TEs, ao desenvolvimento tecnológico de novas TEs, ao projeto de novos PEs tanto em *onshore* como em *offshore*, às infraestruturas de apoio e toda a logística associada, podem dar origem a muitas empresas e consequentemente a muitos empregos de qualidade, de elevada competência, formação e de elevado valor acrescentado.

A gestão da produção e da manutenção dos PEs é fundamental, pois só assim é que se podem otimizar os ativos eólicos e tornar a tecnologia eólica mais competitiva e atrair cada vez mais investidores e investimento.

A manutenção preditiva é uma área recente da manutenção mas com muito futuro. Focaliza-se no monitoramento, análise e previsão de variáveis de controlo, como por exemplo a potência real, o desempenho, a eficiência, a temperatura e a pressão de fluidos de lubrificação e de refrigeração, a vibração e o ruído de peças, o tipo e o número de partículas existentes nos fluidos de lubrificação e de refrigeração. Usa os dados recolhidos e armazenados nos sistemas de supervisão, de controlo e de aquisição de dados (*SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition*) das TEs. Com baixos investimentos em programas de análise e previsão dos dados *SCADA* podem-se obter poupanças significativas na gestão da produção e da manutenção das TEs.

Com a instalação de PEs em *offshore* e em sítios cada vez mais difíceis de aceder com facilidade e a baixo custo, torna-se quase obrigatório às empresas de produção de TEs e às empresas de gestão da produção e manutenção dos PEs que apostem e invistam na manutenção preditiva, sendo mais uma ferramenta para poderem rentabilizar e promoverem os seus negócios. Portanto a otimização e a sustentabilidade dos PEs, do ponto de vista económico, social e ambiental só é conseguido através da aplicação de sistemas integrados de gestão de operação e da manutenção, com atenção especial na manutenção preditiva.

## 1.2. Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver metodologias que permitam através dos *inputs* meteorológicos (velocidade e direção do vento, temperatura e pressão do ar), dos *inputs*

dos parâmetros reais do comportamento do aparelho (potência elétrica), dos *inputs* dos parâmetros teóricos da turbina fornecidos pelo fabricante (curva da potência de referência teórica do fabricante) e dos *inputs* dos dados históricos de intervenções das equipas de manutenção, tratar e analisar essa informação para ser utilizada na manutenção preditiva das turbinas, com o objetivo de gerar *outputs* de previsão de avarias graves e assim ajudar na otimização dos ativos eólicos, reduzindo os custos de operação e manutenção dos PEs.

Embora o objetivo geral desta dissertação pertença à área da manutenção preditiva de TEs, uma área muito abrangente, são analisadas mais detalhadamente as variáveis de controlo: desempenho e eficiência da TE.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Averiguar quais as avarias mais típicas e mais graves nas TEs;
- Selecionar as variáveis de controlo e as métricas de análise para a deteção de avarias graves;
- Criar uma metodologia para determinar, aproximar e expressar analiticamente a curva de potência de referência teórica do fabricante de TEs;
- Criar uma metodologia para analisar “o estado de saúde”, em períodos passados da TE, através da comparação da curva de potência de referência teórica do fabricante da TE com a curva de potência real;
- Criar e testar metodologias (com e sem filtros) para prever a evolução futura “da saúde” da TE, através da comparação da curva de potência de referência teórica do fabricante da TE com a curva de potência real;
- Implementar as metodologias em MATLAB;
- Aplicar os programas MATLAB a TEs reais;
- Retirar conclusões das relações entre a variação da curva de potência real e a curva de potência teórica (desempenho e eficiência) e a deteção de avarias graves.

### 1.3. Contribuições originais

Com o objetivo de avaliar o funcionamento e prever avarias em TEs foram elaboradas e aplicadas em MATLAB cinco metodologias que utilizam a função analítica da curva de potência de referência teórica do fabricante de TEs e os dados do *SCADA*. A contribuição original das metodologias propostas foi que para além de fazerem uma análise e previsão de desempenho e eficiência global da TE, para todas as velocidades do vento, fazem também uma análise e previsão de desempenho e eficiência para quatro intervalos específicos de velocidade do vento [5,75-6,25], [7,75-8,25], [10,75-11,25] e [11,75-12,25] m/s.

### 1.4. Estrutura da dissertação

O trabalho desenvolvido estendeu-se, muito para lá dos objetivos propostos, devido à complexidade do tema central da dissertação, a manutenção preditiva de TEs. Este é um assunto multidisciplinar, envolvendo conhecimentos tão diversos como tecnologia eólica, estatística e manutenção. Assim, as metodologias para a avaliação do funcionamento e a previsão de avarias em TE utilizando a curva de potência de referência teórica do fabricante é organizada em seis capítulos e quinze anexos.

O capítulo 1 - Introdução, apresenta as motivações que estiveram na base da escolha deste tema e os desenvolvimentos importantes para a realização dos objetivos. O capítulo é finalizado com a estrutura da dissertação, que contém um resumo dos capítulos que a constituem.

O capítulo 2 - Revisão da Literatura, apresenta o enquadramento teórico da dissertação e está estruturado em três subcapítulos: energia eólica e tecnologia das TEs, manutenção e análise estatística de dados. No subcapítulo da energia eólica e tecnologia das TEs é feita uma introdução à energia eólica, à potência eólica, à potência elétrica à saída da TE, à normalização da velocidade do vento, é descrita a curva de potência de uma TE (principais zonas, velocidades do vento e potências), várias formas de obter a expressão analítica e são descritos os principais sistemas e componentes das TEs e especificamente da TE Nordex N90. No subcapítulo da Manutenção é feita uma introdução à importância da manutenção das TEs no presente e no futuro, são descritos os principais conceitos da manutenção – manutenção, fiabilidade, disponibilidade, manutibilidade, *MTBF* e *MTTR*, são definidos os principais tipos de manutenção – corretiva, preventiva sistemática, preventiva condicionada e dentro desta a manutenção preditiva. São enumeradas as vantagens, as desvantagens e alguns exemplos da manutenção preditiva de TE. São listados alguns métodos de monitorização e variáveis de controlo. Aborda-se o tema da otimização da manutenção e o *SCADA*. Por fim analisa-se as principais avarias de TEs, as mais frequentes e as que têm tempos de reparação mais longos. No subcapítulo da análise estatística de dados começa-se por definir as variáveis de controlo, o desempenho e a eficiência e são numeradas e detalhadas as métricas de análise usadas nas metodologias. São descritos os métodos de previsão e análise de séries temporais e por fim são descritos vários filtros.

O capítulo 3 - Metodologias para análise do funcionamento e previsão de avarias em TE utilizando a curva de potência de referência teórica do fabricante são descritas as seis metodologias, para isso está estruturado em seis subcapítulos: metodologia 1 - calcular a massa volumica de referência e a curva de potência de referência teórica do fabricante de uma TE; metodologia 2 – calcular parâmetros de funcionamento da TE (por ano, por mês, por direção e em função da velocidade do vento) para um período de um ano; metodologia 3 - calcular a média e o desvio padrão do desempenho da TE das últimas 52 semanas e prever as próximas 5 semanas (sem filtros); metodologia 4 - calcular a média e o desvio padrão do desempenho da TE dos últimos 31 dias e prever os próximos 7 dias (sem filtros); metodologia 5 - calcular a eficiência da TE das últimas 52 semanas e prever as próximas 5 semanas, para quatro intervalos da velocidade do vento (com filtros); e metodologia 6 – calcular a eficiência da TE nos últimos 31 dias e prever os próximos 7 dias, para quatro intervalos da velocidade do vento (com filtros).

O capítulo 4 - Descrição dos quatro programas criados em MATLAB está estruturado em quatro subcapítulos: o programa Calcular\_M\_Vol\_Ref\_Curva\_Pot\_Ref que aplica a metodologia 1, o programa AnaliTE2 que aplica as metodologias 2, 3 e 4, o programas AnaliTE\_CEP\_52semanas que aplica a metodologia 5 e o programa AnaliTE\_CEP\_31dias que aplica a metodologia 6.

O capítulo 5 - Análise de dados Reais de TE é feita a análise de dois PEs, o PE1 com cinco TEs e o PE2 com oito TEs. As treze TEs analisadas são todas da marca NORDEX, modelo N90 diâmetro do rotor de 90 m e potência nominal de 2300 kW. A análise está estruturada em quatro subcapítulos que aplicam as respetivas metodologias: aplicação da metodologia 1 aos dois PEs, para determinar as curvas de potência de referência teórica do fabricante, aplicação da metodologia 2 aos dois PEs para diagnosticar o funcionamento das 13 TEs no passado, aplicação das metodologias 3 e 4 para analisar as tendências e prever o estado de desempenho para os próximos dias e/ou semanas, na tentativa de prever avarias graves e aplicação das metodologias 5 e 6 para analisar as tendências e prever o estado de eficiência para os próximos dias e/ou semanas, na tentativa de prever avarias graves.

No capítulo 6 - Conclusões e trabalhos futuros, são detalhadas as conclusões e explicados alguns desenvolvimentos futuros que poderão ser introduzidos no sistema de modo a torná-lo mais eficiente, robusto, inovador, necessário, abrangente, fiável e por isso mais necessário.



## **Capítulo 2 - Revisão da literatura**

A humanidade vive momentos de preocupação devido às necessidades de mitigação das emissões de gases de efeito de estufa e aos custos associados às ações de adaptação às alterações climáticas.

A atual crise ambiental, económica e social obriga cada vez mais a apostar em energias renováveis: eólica, hídrica, solar, oceânica, geotérmica e bioenergia.

As fontes renováveis de energia (sol, água, calor da terra, biológica) são apresentadas como uma das principais alternativas para responder à procura da sociedade no que respeita a qualidade, segurança de satisfação da procura energética, redução dos danos ambientais, cumprimento dos objetivos de redução das emissões de gases de efeito de estufa, diminuição da dependência energética, da balança de pagamentos, dos custos da energia, reforço da diversificação das fontes primárias de energia e apoio ao desenvolvimento das empresas do sector energético com ênfase na criação de empregos.

A política energética, da mesma maneira que o desenvolvimento da humanidade, tem que apostar nos três pilares da sustentabilidade: competitividade económica, segurança social e preservação ambiental.

### **2.1. Energia eólica e tecnologia das TEs**

O vento é uma fonte de energia limpa quando utilizado não produz gases de efeito de estufa. A energia eólica é renovável e gratuita, pelo que não importa a quantidade que se utiliza hoje já que ela estará igualmente disponível no futuro.

A produção eólica deverá ser acompanhada de medidas eficazes de redução do consumo de energia através do aumento da eficiência energética e da utilização racional da energia.

#### **2.1.1. Energia eólica**

A conversão do vento, energia eólica, que é a energia cinética associada ao ar em movimento, em energia elétrica é efetuada nas TEs. O vento incide nas pás que compõem o rotor e a sua energia cinética é transformada em energia mecânica, que é transmitida ao gerador elétrico, onde é convertida em energia elétrica.

#### **2.1.2. Principais sistemas e componentes das TEs**

A figura 2.1 mostra os principais componentes de uma TE de eixo horizontal (Castro, 2011).

O rotor é constituído principalmente pelas três pás, pelo cubo e pela chumaceira principal. É o sistema que tem a função de converter a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação do cubo.

O sistema de transmissão é constituído principalmente pelo veio principal, caixa multiplicadora, veio secundário e acoplamentos. É o sistema que tem a função de transmitir a energia mecânica, entregue pelo eixo do rotor, até ao gerador. Este sistema é responsável por adaptar a velocidade de rotação reduzida do rotor à velocidade de rotação muito mais elevada do campo girante criado no gerador. A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa

das 30 RPM, limitada pela velocidade na ponta das pás onde a velocidade tangencial é mais elevada (*tip speed*). Os geradores trabalham a rotações muito mais elevadas (normalmente, na faixa das 1.500 RPM), sendo portanto necessário a instalação de um sistema de multiplicação das rotações entre o veio principal de baixa rotação e o veio secundário de alta rotação. Atualmente, algumas TE's construídas por alguns fabricantes (como as TE's E70-2300 kW, E82-3000 kW e a E126-7500 kW da ENERCON) não têm caixa multiplicadora. Assim, em vez de ser utilizada uma caixa multiplicadora para adaptar as velocidades do rotor e do gerador, são utilizados geradores de baixa velocidade com muitos polos.

O gerador elétrico é o sistema que tem a função de converter a energia mecânica de rotação em energia elétrica;

A torre permite elevar as pás e todo o sistema mecânico e elétrico para ventos mais regulares e mais energéticos;

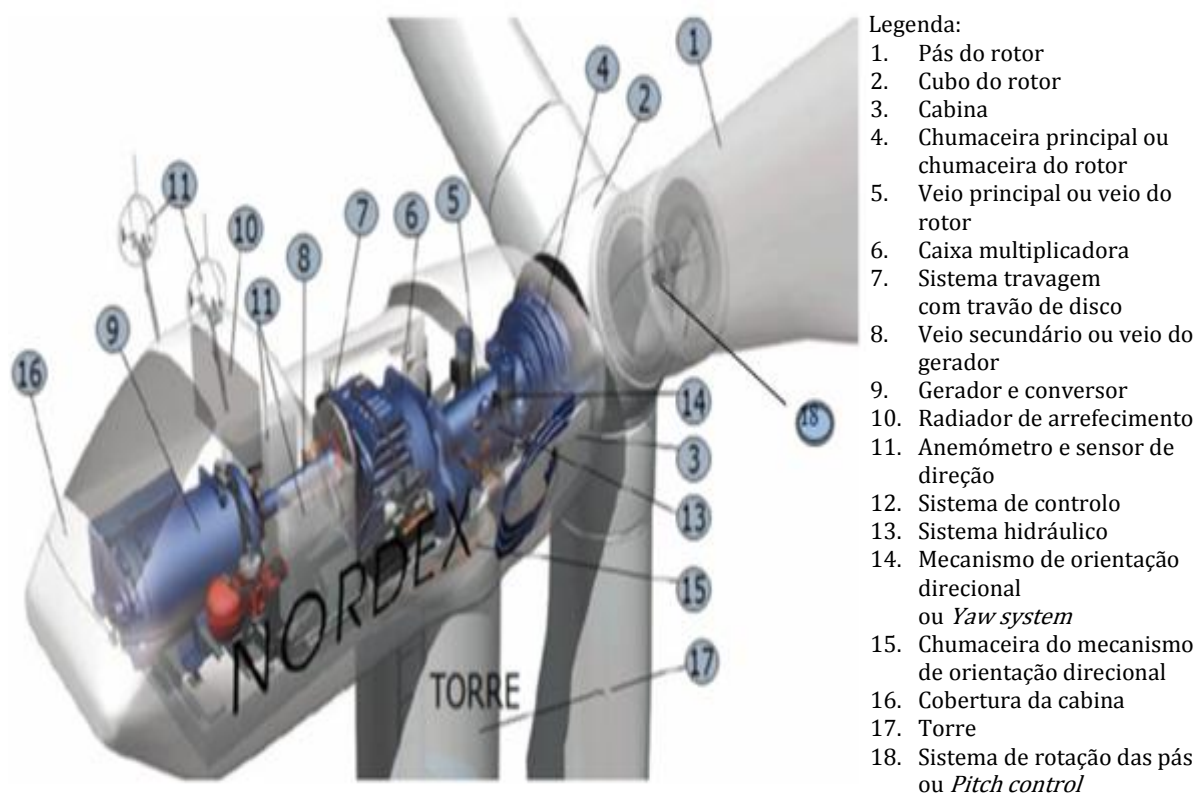


Figura 2.1 – Esquema de uma TE de eixo horizontal (Castro, 2011)

O sistema de controlo tem, por um lado a função de controlar a qualidade e a quantidade da energia produzida pela TE, por outro lado tem a função de segurança, de evitar o sobre carregamento elétrico do gerador e o sobre carregamento mecânico do sistema de transmissão. O sistema de controlo pode ser dividido em sete subsistemas: o meteorológico, o de orientação da cabine, o de orientação das pás, o de travagem mecânica, o de lubrificação e refrigeração, o de conversão e transformação e o de controlo geral.

Os mecanismos de controlo podem ser mecânicos (travão), aerodinâmicos (posicionamento da cabine e orientação das pás) ou eletrónicos (controlo da carga).

O subsistema meteorológico tem como principais funções medir a velocidade e direção do vento.

O subsistema de controlo geral da TE tem como principal função coordenar os outros subsistemas, isto é, receber *inputs* dos outros subsistemas, executar os seus procedimentos, programas e rotinas e enviar *outputs* para esses mesmos subsistemas para manter a TE a funcionar eficientemente, em segurança e com produção elétrica de qualidade.

O subsistema de orientação das pás, ou subsistema de controlo do ângulo de passo (*Pitch control*) tem como principais funções o controlo da potência elétrica produzida pela TE e a segurança da TE. Em caso de ventos fortes (ventos com velocidades superiores a  $V_{cut\_out}$ ), é necessário desligar a TE e colocar as pás em posição de menor oposição ao vento, a fim de evitar danificar a TE (função segurança). Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada devido a um aumento da velocidade do vento, o subsistema de controlo geral envia um sinal ao mecanismo de mudança do ângulo de passo e as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal, isto é, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque de forma a diminuir a oposição ao vento. Esta redução diminui as forças aerodinâmicas (sustentação e de arrasto) e consequentemente a extração de potência do vento, com a consequente limitação da potência elétrica à potência nominal. Assim para velocidades do vento superiores à velocidade nominal da TE, o ângulo de passo é alterado e mantido de forma a produzir apenas a potência nominal (função controlo de potência).

O subsistema de orientação da cabine (*Yaw control*) tem como principal função orientar a cabine perpendicular à direção do vento (função maximizar a potência).

O subsistema de travagem mecânica tem como principal função a segurança, isto é, o travão mecânico de disco só é usado em situações de emergência devidas a falha no travão aerodinâmico ou para efetuar operações de manutenção.

### 2.1.3. Potência eólica

A potência disponível no vento (W) é:

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.1.1)$$

em que A é a área varrida pelo rotor da TE ( $m^2$ ),  $\rho$  é a MV do ar ( $kg/m^3$ ) e v é a velocidade do ar (m/s) (Castro, 2011).

Analisando a equação 2.1.1 facilmente se verifica que a potência eólica é fortemente influenciada pela velocidade do ar, ou seja, se a velocidade do vento duplicar, a potência aumenta oito vezes. No entanto, se a área das pás das TEs ou a MV do ar duplicar a potência aumenta apenas duas vezes.

Como se pode verificar a potência eólica também depende da MV do ar, que varia com a temperatura e com a pressão atmosférica, de acordo com a norma internacional IEC 61400-12-1 (IEC 61400-12-1,2005), conforme as seguintes equações:

$$\rho_{(10min)} = 100 \cdot \frac{p_{r(10min)}}{R_o \cdot T_{K(10min)}} \quad (2.1.2)$$

$$R_o = 287,05 \text{ J/(Kg. K)} \quad (2.1.3)$$

$$T_{K(10min)} = T_{C(10min)} + 273,15 \quad (2.1.4)$$

em que  $\rho_{(10\text{min})}$  é a MV média do ar durante 10 minutos calculada para um determinado local e para umas determinadas condições atmosféricas (pressão e temperatura),  $p_{r(10\text{min})}$  é a pressão média do ar durante 10 minutos (mbar),  $TC_{(10\text{min})}$  é a temperatura média do ar durante 10 minutos (em °C),  $TK_{(10\text{min})}$  é a temperatura média do ar durante 10 minutos (em K) e  $R_o$  é a constante específica do ar seco. Para uma temperatura média de 288,15 K (15 °C) e uma pressão média do ar de 1 atm (1013,25 mbar) a MV média do ar é aproximadamente igual a 1,225 kg/m<sup>3</sup>.

Pela equação (2.1.2) pode concluir-se que para a mesma temperatura do ar de 278 K a MV do ar pode variar mais de 25% de um local para outro, isto é, pode-se ter uma MV do ar de 1,000 kg/m<sup>3</sup> num local de altitude elevada com uma pressão do ar de 800 mbar e pode-se ter uma MV do ar de 1,250 kg/m<sup>3</sup> num local à altitude do mar com uma pressão do ar de 1000 mbar. Pode também concluir-se que para a mesma pressão do ar de 800 mbar a MV do ar pode variar mais de 14 % num mesmo local, isto é, pode ter-se uma MV do ar de 1,040 kg/m<sup>3</sup> para uma temperatura do ar de 268 K e pode ter-se uma MV do ar de 0,900 kg/m<sup>3</sup> para uma temperatura do ar de 308 K. Portanto, a potência que a TE tem ao longo do dia e ao longo do ano, num determinado local, varia fundamentalmente com a variação da velocidade do vento e em menor grau com a variação da temperatura, sendo a área varrida pelo rotor da TE constante e a pressão do ar quase constante.

A potência elétrica à saída da TE é:

$$P_{\text{elect}} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.1.5)$$

em que  $C_p$  é o coeficiente de potência e representa o rendimento total da TE que inclui os rendimentos aerodinâmico das pás, da transmissão, do gerador e do transformador (Castro, 2011).

#### 2.1.4. Curva de potência das TEs

A curva de potência de uma TE é uma curva que representa a potência elétrica gerada pela TE para diferentes valores da velocidade do vento e normalmente é fornecida pelos fabricantes das TEs.

A curva da figura 2.2 é a curva de potência da TE Vestas de 2 MW, para uma MV do ar de 1,225 kg/m<sup>3</sup>, com o diâmetro do rotor de 90 m e com uma altura do rotor de 80 m, cujos valores disponibilizados pela Vestas estão no Anexo M.

Como se pode observar na figura 2.2, a curva de potência está dividida em quatro zonas de funcionamento, tem três velocidades de vento especiais e uma potência máxima de funcionamento que define a potência da TE (Castro, 2011).

Na zona I a potência elétrica gerada pela TE é nula. As TEs começam a produzir energia a partir da velocidade do vento  $V_{\text{cut\_in}}$ , próxima dos 4 m/s.

$V_{\text{cut\_in}}$  é a velocidade do vento em que a TE começa a produzir eletricidade, neste caso 3 m/s.

Na zona II a potência elétrica gerada pela TE varia aproximadamente com o cubo da velocidade do vento. É nesta zona em que frequência de ocorrência da velocidade do vento (%) é maior, por isso é nesta zona que a energia disponível no vento ao longo do tempo é maior



(gráfico da figura 4.21), logo, é nesta zona que se pretende que a TE extraia a máxima potência possível do vento.

A potência nominal é a potência máxima que a TE produz, neste caso 2.000 kW.

A velocidade nominal é a velocidade do vento em que a potência nominal é atingida, normalmente entre 13 a 16 m/s, neste caso 13 m/s.

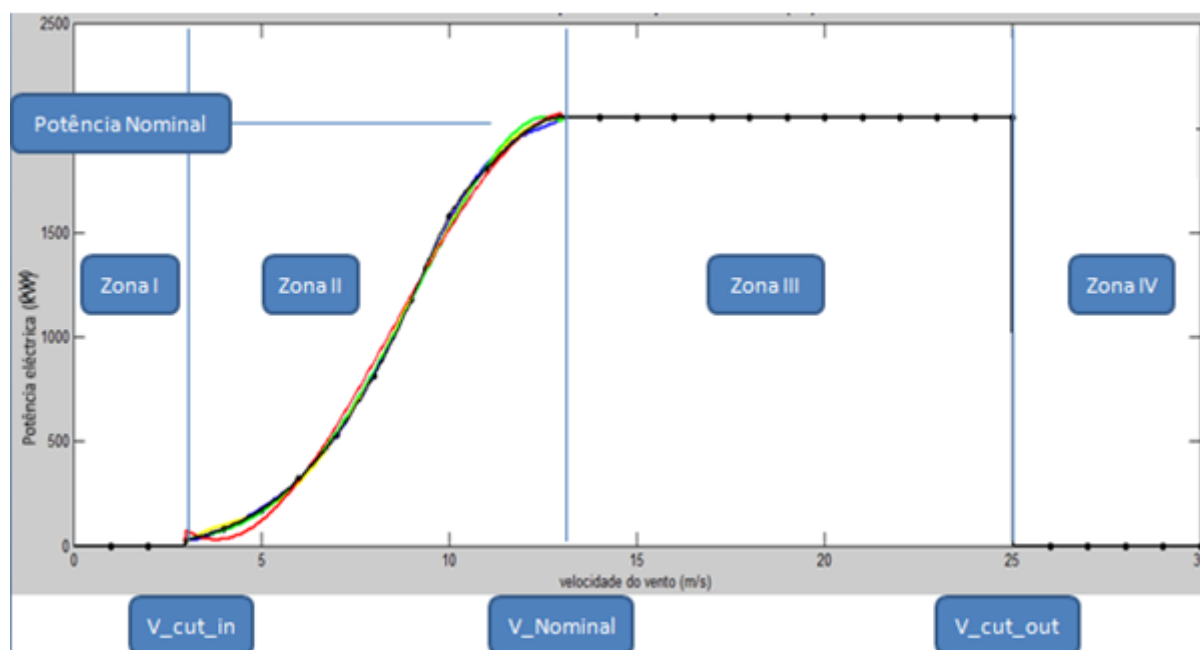


Figura 2.2 – Curva de potência de uma TE de 2 MW da Vestas

Na zona III entre a velocidade nominal e a velocidade do vento de paragem a potência elétrica gerada pela TE é constante e igual à potência nominal. Para valores superiores à velocidade nominal do vento não é económico aumentar a potência, pois isso obrigaria a robustecer a construção, ao aumento do investimento e apenas se tiraria partido durante poucas horas no ano. O controlo de potência pode ser do tipo *pitch* ou do tipo *stall*. Havendo uma perda acentuada de rendimento da TE nesta zona, como é pretendido e obrigatório.

$V_{cut\_out}$  é a velocidade do vento de paragem (*cut-out wind speed*), é a velocidade do vento em que a TE deixa de produzir eletricidade. Por razões de segurança quando a velocidade do vento se torna perigosamente elevada (normalmente a 25 m/s), neste caso 25 m/s.

Na zona IV para velocidades do vento superiores à velocidade do vento de paragem a potência elétrica gerada pela TE é nula.

### 2.1.5. Expressão analítica para a curva de potência teórica do fabricante

É de extrema importância para os modelos de diagnóstico e prognóstico propostos nesta dissertação, conhecer a função analítica que melhor aproxima o conjunto de pontos, neste caso fornecidos pelo fabricante da TE que representam a potência da TE em função da velocidade do vento (para uma determinada MV de referência do ar).

Na zona II em que a potência varia com a velocidade do vento, podem ser usadas diferentes funções matemáticas para representar a curva de potência teórica, como por exemplo a função sigmoide e as funções polinomiais.

Uma das técnicas utilizadas é o método dos mínimos quadrados (Aubyn, 2011), que consiste em aproximar os dados por uma função que minimiza o erro quadrático em cada um dos pontos.

O Matlab fornece a função *polyfit* para o ajuste de curvas através deste método. A função apresenta a sintaxe  $p = \text{polyfit}(x,y,n)$ , em que  $x$  e  $y$  designam os pontos da curva de potência fornecidos pelo fabricante ( $x$  a velocidade do vento em m/s e  $y$  a potência elétrica da TE em kW) e  $n$  a ordem ou grau do polinómio para ajuste dos dados. O vetor  $p$  é um vetor linha de comprimento  $n+1$ , com os coeficientes do polinómio que melhor ajusta os dados.

Na figura 2.3 estão representados os dados fornecidos pelo fabricante da TE por círculos pretos e as várias curvas de potência aproximadas por polinómios de grau 3, 4, 5 e 6 e o polinómio *spline*.

Como se pode observar as curvas de potência aproximada, descritas pelos polinómios de grau 3, 4, 5 e 6 desviam-se dos pontos fornecidos pelo fabricante, enquanto a curva *spline* a preto coincide a 100 % com os pontos fornecidos pelo fabricante.

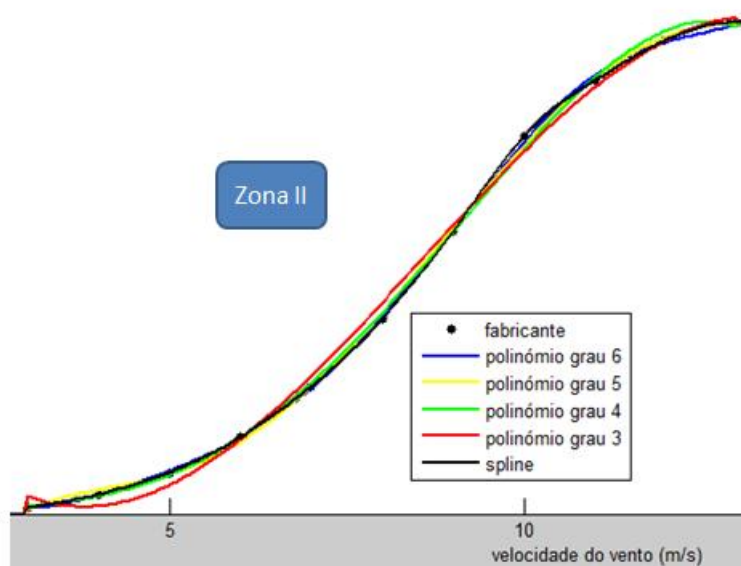


Figura 2.3 – Pontos da zona II de potência fornecidos pelo fabricante e curvas de potência aproximadas por polinómios de grau 3, 4, 5 e 6 e o polinómio *spline*

Para conhecer a função analítica que melhor aproxima o conjunto de pontos, fornecidos pelo fabricante da TE, em Matlab fez-se:

1. Para cada polinómio de grau  $n$  foi calculada a potência teórica aproximada para cada velocidade do vento na Zona II:

$$P_{\text{teorica\_aprox\_polin\_grau\_n}} = \text{polyval}(p, x) \quad (2.1.6)$$

Os valores obtidos podem ser observados na tabela 2.1.

2. De seguida calculou-se a diferença entre a potência do fabricante e a potência aproximada:

$$\text{Dif}_n = P_{\text{fabricante}} - P_{\text{teorica\_aprox\_polin\_grau\_n}} \quad (2.1.7)$$

Os valores obtidos podem ser observados na tabela 2.2.

3. E por fim calculou-se o desvio padrão das diferenças de potência:

$$\text{Desvio_Padrão}_n = \text{Std} (\text{Dif}_n) \quad (2.1.8)$$

Os valores obtidos podem ser observados na tabela 2.3.

Tabela 2.1 – Potência do fabricante e potência aproximada para os polinômios de grau 3, 4, 5 e 6

Velocidade do Vento (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
P_fabricante (kW)	25	82	174	321	532	815	1180	1580	1810	1980	2050
P_teorica_aprox_polin_grau_3 (kW)	74	32	122	312	575	883	1205	1514	1781	1977	2073
P_teorica_aprox_polin_grau_4 (kW)	32	74	163	319	548	841	1177	1521	1823	2019	2032
P_teorica_aprox_polin_grau_5 (kW)	19	100	168	302	530	841	1195	1539	1819	1993	2045
P_teorica_aprox_polin_grau_6 (kW)	25	79	180	318	525	823	1190	1555	1832	1972	2051

Tabela 2.2 – Diferença entre a potência do fabricante e a potência teórica aproximada para os polinômios de grau 3, 4, 5 e 6

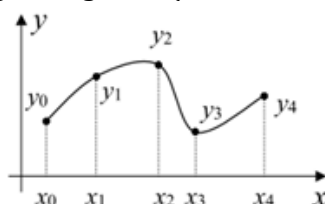
Dif_3 (kW)	-49	50	52	9	-43	-68	-25	66	29	3	-23
Dif_4 (kW)	-7	8	11	2	-16	-26	3	59	-13	-39	18
Dif_5 (kW)	6	-18	6	19	2	-26	-15	41	-9	-13	5
Dif_6 (kW)	0	3	-6	3	7	-8	-10	25	-21	9	-1

Tabela 2.3 – Desvio padrão das diferenças de potência para os polinômios de grau 3, 4, 5 e 6

Desvio_Padrão_3 (kW)	45
Desvio_Padrão_4 (kW)	26
Desvio_Padrão_5 (kW)	19
Desvio_Padrão_6 (kW)	12

Conclui-se que a função de polinômio de grau 6 tem um menor erro de aproximação aos pontos da curva de potência fornecidos pelo fabricante e a função de polinômio de grau 3 é a que apresenta pior aproximação, mas mesmo o polinômio de grau 6 apresenta desvios padrão de 12 kW, por isso para eliminar este desvio padrão aplica-se outra técnica, designada por interpolação por *splines* cúbicas, que garante uma interpolação exata dos dados, através da curva designada por *spline* (Morais et.al, 2006). A função apresenta a sintaxe  $pp = \text{spline}(x,y)$ , em que  $x$  e  $y$  designam os pontos originais da curva de potência fornecidos pelo fabricante ( $x$  a velocidade do vento em m/s e  $y$  a potência elétrica da TE em kW) e  $pp$  designa a estrutura com os coeficientes da curva *spline*. Quando a estrutura  $pp$  é passada à função *ppval*, na forma *ppval*( $pp, xx$ ), esta retorna os valores do polinômio *spline* nos pontos especificados em  $xx$ . O desvio padrão dos valores do polinômio *spline* nos pontos originais em  $x$ , fornecidos pelo fabricante é nulo ( $\text{Desvio\_padrão\_Polinomio\_spline} = 0$  (kW)).

A interpolação por *splines* cúbicas ou interpolação por *splines* polinomiais de grau 3 são funções polinomiais de grau menor ou igual a 3 que se ligam de forma contínua, que passam pelos valores a interpolar e asseguram a continuidade da primeira e segunda derivadas nos nós  $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$ , como se pode ver na figura seguinte (Fontes, 2009).



Os polinômios  $S_i$ , definidores do *spline*  $S$ , podem ser escritos em cada subintervalo como:

$$S_i(x) = a_i \cdot x^3 + b_i \cdot x^2 + c_i \cdot x + d_i, \quad i=1, \dots, n$$

Os polinômios  $S_i(x)$  obtêm-se da seguinte maneira:

$$S_i(x) = M_{i-1} \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + M_i \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_i} + \left( y_{i-1} - \frac{M_{i-1}h_i^2}{6} \right) \frac{x_i - x}{h_i} + \left( y_i - \frac{M_i h_i^2}{6} \right) \frac{x - x_{i-1}}{h_i}$$

$$h_i = x_i - x_{i-1}$$

Os parâmetros  $M_i$  são habitualmente designados por momentos.

Os momentos  $M_0, M_1, \dots, M_{n-1}, M_n$ , deverão satisfazer as equações:

$$\frac{h_i}{6} M_{i-1} + \frac{h + h_{i+1}}{3} M_i + \frac{h_{i+1}}{6} M_{i+1} = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}} - \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i}$$

para  $i = 1, 2, \dots, n-1$ .

Obtem-se assim um sistema com  $n-1$  equações e com  $n+1$  incógnitas  $M_0, M_1, \dots, M_{n-1}, M_n$ , mas impondo-se  $M_0 = 0$  e  $M_n = 0$ , resolvendo o sistema obtêm-se o *spline* natural.

Atendendo a que a curva do polinômio *spline* é de maior qualidade, a curva de potência teórica do fabricante foi definida analiticamente como:

$$\begin{cases} Pt_{(10min)} = 0 & \text{para } Vn_{(10min)} < V_{cut\_in} \\ Pt_{(10min)} = ppval(pp, Vn) & \text{para } V_{cut\_in} \leq Vn_{(10min)} < V_{Nominal} \\ Pt_{(10min)} = P_{nominal} & \text{para } V_{Nom} \leq Vn_{(10min)} \leq V_{cut\_out} \\ Pt_{(10min)} = 0 & \text{para } Vn_{(10min)} > V_{cut\_out} \end{cases} \quad (2.1.9)$$

### 2.1.6. Normalização da velocidade do vento

De acordo com as equações (2.1.1) e (2.1.2) a potência instantânea da TE varia ao longo do ano e do dia com a velocidade do vento, com a temperatura e com a pressão. Para que a potência da TE dependa somente da velocidade do vento e não dependa da MV do ar (função da temperatura e da pressão do ar) faz-se a normalização da velocidade do vento para a MV de referência. Esta normalização é fundamental para o estudo da variação do desempenho e da eficiência da TE ao longo do tempo, pois quer-se verificar se existe uma perda do desempenho e da eficiência da TE nos últimos dias ou semanas antes de avarias graves.

A potência teórica do fabricante é calculada através da função (2.1.9) curva de potência de referência teórica (específica para uma dada MV do ar de referência), em que a potência é somente função da velocidade do vento normalizada, para isso a velocidade do vento tem que ser normalizada, para entrar em conta com a variação da MV do ar ao longo do dia e do ano devido às variações das condições ambientais.

Com os dados do Anexo A – Curvas de potência da TE Nordex N90 para diferentes MV do ar, foi executado o gráfico da figura 2.3 – gráfico das curvas de potência da TE Nordex N90, para as MV de ar, que neste caso variam de 1,015 kg/m<sup>3</sup> até 1,305 kg/m<sup>3</sup>.

Como pode observar-se na figura 2.4, uma TE Nordex N90 num local com condições atmosféricas com uma MV média do ar de 1,015 kg/m<sup>3</sup>, para uma velocidade do vento de 10 m/s

normalizada, o fabricante indica que a TE apresenta uma potência de 1.342 kW. Mas a mesma TE Nordex N90, num outro local com condições atmosféricas com uma MV média do ar de 1,305 kg/m<sup>3</sup>, para uma velocidade do vento de 10 m/s normalizada, o fabricante indica que a TE apresenta uma potência de 1.733 kW. Portanto a potência da TE indicada pelo fabricante, para estas duas situações varia em 391 kW de 1.342 kW até 1.733 kW para uma variação da MV média do ar de 1,015 kg/m<sup>3</sup> até 1,305 kg/m<sup>3</sup>, ou seja 30 %.

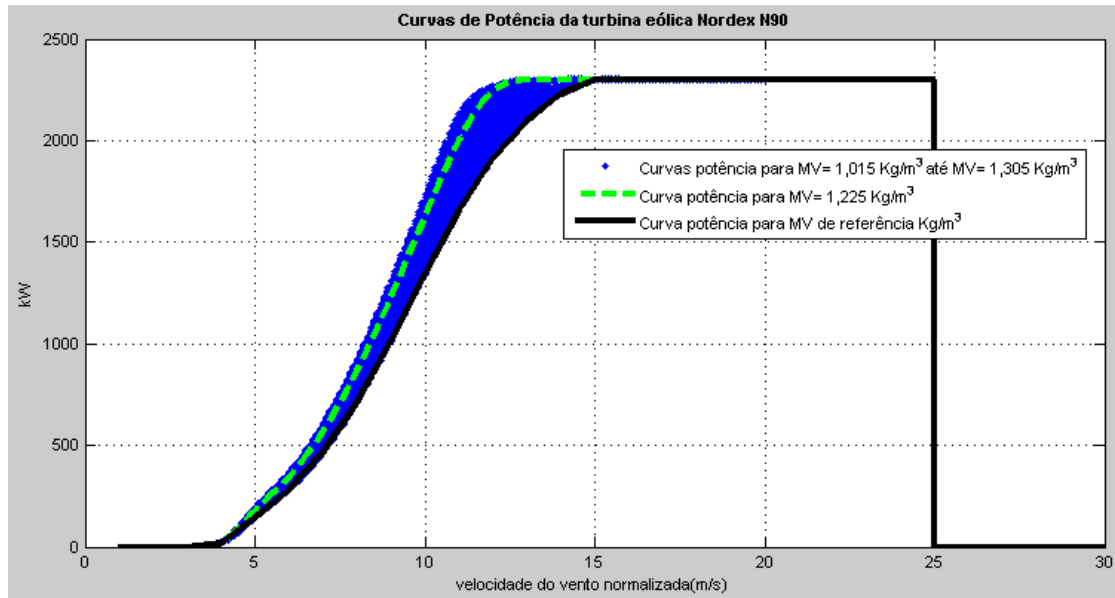


Figura 2.4 – Curvas de potência da TE Nordex N90 para diferentes MV do ar

Se a diferença de MV média do ar fosse maior, também a diferença de potência indicada pelo fabricante da TE seria maior, por isso quando se utiliza a curva de potência para calcular a potência teórica da TE, para uma determinada velocidade do vento, é necessário assegurar que se está a usar a curva de potência de referência próxima da MV média do ar do respetivo local. Nesse sentido, na análise dos dados reais de uma TE e na comparação com valores teóricos do fabricante, num determinado local e para um determinado período de tempo, o primeiro passo é determinar a MV média do ar e a respetiva MV de referência do ar:

$$\rho_{(media)} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_{(10min)}}{N} \quad (2.1.10)$$

em que  $\rho_{(media)}$  é a MV média do ar para o período Nx10 minutos em análise, N é o número de períodos de 10 minutos e  $\rho_{(10min)}$  é a MV média do ar de cada período de 10 minutos.

Idealmente, a MV de referência do ar devia ser igual à MV média do ar, mas como não existem as curvas de potência do fabricante para todas as MV médias do ar, o que se faz é utilizar a MV de referência do ar do fabricante que mais se aproxima da MV média do ar de acordo com a norma internacional IEC 61400-12-1 (IEC 61400-12-1,2005). Por exemplo se a MV média do ar é igual a 1,019 kg/m<sup>3</sup> e a curva de potência do fabricante com MV de referência mais próxima é a que tem a MV do ar igual a 1,015 kg/m<sup>3</sup>, então usa-se a MV de referência do ar para os cálculos de 1,015 kg/m<sup>3</sup>.

O segundo passo é normalizar a velocidade do vento, que é feita de acordo com a norma internacional IEC 61400-12-1 (IEC 61400-12-1,2005), com a seguinte fórmula:

$$Vn_{(10min)} = V_{(10min)} \cdot \left( \frac{\rho_{(10min)}}{\rho_{(ref)}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.1.11)$$

em que  $V_{n(10min)}$  é a velocidade do vento normalizada para períodos de 10 minutos (m/s),  $\rho_{(10min)}$  é a MV média do ar medida para períodos de 10 minutos, num determinado local e para determinadas condições atmosféricas ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho_{(ref)}$  é a MV de referência do ar (calculada no passo anterior) e  $V_{(10min)}$  é a velocidade média do vento medida no anemómetro da TE para períodos de 10 minutos (m/s).

Pela equação (2.1.11) pode afirmar-se que a velocidade do vento normalizada aumenta com o aumento da velocidade média do vento medida e com a MV média do ar medida, e diminui com o aumento MV de referência do ar. Também pode afirmar-se que a velocidade do vento normalizada é superior à velocidade média medida se a MV média do ar medida for superior à MV de referência da curva de potência adotada e vice-versa. Por isso ao longo de um dia em que exista uma grande variação da temperatura, por exemplo de 5 °C até 35 °C, onde a MV de referência é 1,200  $\text{kg/m}^3$ , a velocidade normalizada vai ser superior à velocidade medida nos períodos mais frios com temperaturas perto dos 5 °C e pelo contrário a velocidade normalizada vai ser inferior à velocidade medida nos períodos mais quentes com temperaturas perto dos 35 °C. Logo a potência teórica do fabricante normalizada vai ser superior nos períodos mais frios e inferior nos períodos mais quentes. É o que acontece na realidade com a potência real medida, que é superior nos períodos noturnos e inferior nos períodos diurnos, é superior no inverno e inferior no verão em que as temperaturas são superiores.

A normalização permite que o desempenho e a eficiência da TE permaneçam constante ao longo do dia e ao longo do ano, independente das condições atmosféricas, dependentes só do estado de funcionamento da TE, ou seja, depois de normalizada a velocidade do vento a eficiência permanece constante e igual a 100 % se a TE estiver a funcionar normalmente sem defeitos. Assim se por algum motivo (avaria de uma peça, desgaste dum componente, manutenção, inspeção, operador novo) a eficiência começar a diminuir, essa diminuição é devida somente à TE, não advém da variação das condições atmosféricas, só das condições de funcionamento da TE, como é pretendido analisar nesta dissertação.

Um dos objetivos da dissertação é detetar se antes de uma avaria grave as variáveis de controlo: eficiência e desempenho da TE diminuem, para que sempre que voltem a diminuir a esses níveis surjam avisos de perigo, para que sejam tomadas as medidas preventivas necessárias de modo a reduzir os custos de manutenção e produção, e otimizar o ativo TE.

### 2.1.7. Principais sistemas e componentes das TEs Nordex N90

Os dados reais analisados são referentes a TEs Nordex N90. A figura 2.5 mostra os principais componentes de uma TE Nordex N90 (Nordex, 2004) de velocidade do vento variável, com um diâmetro de rotor de 90 m, uma potência nominal de 2.300 kW, três pás de eixo horizontal, com sistema *Pitch* de controlo da potência, velocidade de início de produção 3 m/s, velocidade nominal  $\pm 13$  m/s, velocidade de corte 25 m/s, tempo de vida 20 anos.

O rotor tem 90 m de diâmetro, uma área de 6362  $\text{m}^2$ , *tip* máximo de  $\pm 80$  m/s, potência específica de 362  $\text{W/m}^2$ , rotação de 9,6 até 16,9 RPM e peso total de  $\pm 53.000$  Kg.

O cubo é feito de aço e pesa  $\pm 22.500$  Kg.

As pás são feitas em material compósito com fibras de vidro e poliéster e cada uma pesa  $\pm 10.200$  Kg.

O veio principal pesa  $\pm 11.300$  Kg e os rolamentos de suporte são auto alinhados.

A caixa multiplicadora é constituída por dois estágios de planetários e um estágio de engrenagens de dentes retos, é refrigerada por um circuito de refrigeração óleo-ar, a lubrificação é feita através do próprio movimento das engrenagens, a temperatura do óleo e dos rolamentos são constantemente monitorizados, a taxa de transmissão é  $\pm 1:77$ , leva aproximadamente 360 l de óleo de lubrificação e refrigeração e pesa  $\pm 18.500$  Kg.

O gerador é uma máquina de indução assíncrona duplamente alimentada com uma potência nominal de 2.300 kW, é refrigerado através de um circuito de refrigeração de água e glicol, tensão nominal de 660 V, frequência de 50 Hz, velocidade de rotação de 740 a 1.310 RPM, seis polos e pesa  $\pm 10.000$  Kg.

O sistema *Yaw* tem dois equipamentos de medida da direção do vento por cima da cabine, tem dois motores com caixas de redução com quatro estágios de planetários, uma coroa dentada, um sistema de travagem hidráulico e um rolamento de esferas que pesa  $\pm 2.300$  Kg.

O sistema de controlo da TE é feito por um controlador lógico programável (*PLC*) que analisa os dados que vêm dos vários sensores da TE e gera sinais de controlo para a TE. Tem dois equipamentos para medir a velocidade do vento. Um anemómetro é usado para controlar a TE e o outro para monitorizar o primeiro. Se o primeiro falha o segundo é usado para o controlo da TE. Um ecrã para monitorizar e verificar todos os dados operacionais da TE como para controlar algumas funções da TE. Tem um sistema remoto de monitorização, a correção do fator de potência pode ser ajustado para um valor de 0,9 indutivo e 0,95 capacitivo no conversor a IGBTs, no caso de uma falha na rede elétrica o controlo e as válvulas hidráulicas são mantidas em função durante pelo menos 10 minutos por um sistema de alimentação ininterrupta (UPS).

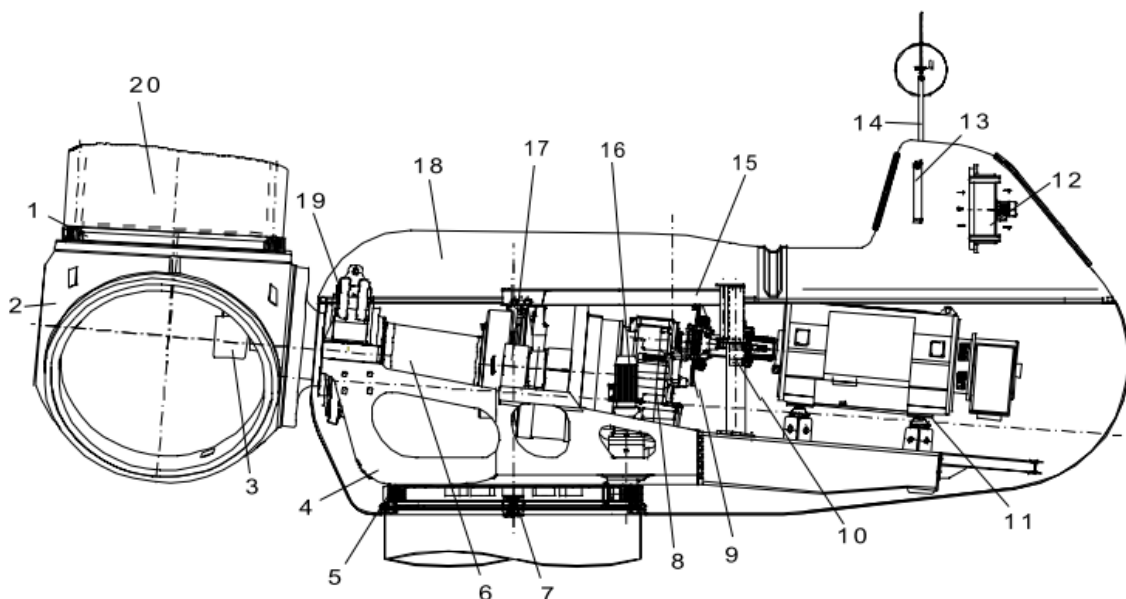


Figura 2.5 – Vista geral da cabine de uma TE Nordex N90 (Nordex, 2004)

1 Chumaceira do sistema <i>Pitch</i>	11 Gerador
2 Cubo do rotor	12 Refrigerador do gerador
3 Motor do sistema <i>Pitch</i>	13 Refrigerador da caixa multiplicadora
4 Estrutura da cabine	14 Sensores do vento
5 Chumaceira do sistema <i>Yaw</i>	15 Sistema para içar
6 Veio principal do rotor	16 Motor do sistema <i>Yaw</i>
7 Travões do sistema <i>Yaw</i>	17 Chumaceira secundária
8 Caixa multiplicadora	18 Cobertura da cabine
9 Travão mecânico de segurança	19 Chumaceira principal
10 Acoplamento ao gerador	20 Pá do rotor

Os sistemas de refrigeração da TE são três e independentes entre si. O sistema de refrigeração da caixa multiplicadora, o sistema de refrigeração do gerador e o sistema de refrigeração do conversor. Estes sistemas são projetados para que a TE possa funcionar normalmente para temperaturas ambientes elevadas. O monitoramento da temperatura de alguns rolamentos da caixa multiplicadora, do óleo da caixa multiplicadora, do enrolamento do gerador, dos rolamentos do gerador e dos fluidos de refrigeração é feito permanentemente. A refrigeração da caixa multiplicadora é feita através dum circuito de óleo, na caixa multiplicadora a energia calorífica é transferida para o óleo, o óleo é bombeado até ao permutador de calor óleo/ar onde transfere a energia calorífica para o ar. Neste circuito de óleo existem dois filtros, o primário e o secundário mais fino. O permutador de calor óleo/ar é colocado na parte superior da cabine onde passa ar fresco ou é forçado a passar por meio da ventoinha. De seguida o óleo mais frio é bombeado de novo para a caixa multiplicadora. A refrigeração do gerador é feita através dum circuito de ar de refrigeração. O calor do ar de refrigeração é dissipado num permutador de calor a água refrigerada. A refrigeração do conversor é feita através dum circuito de água de refrigeração. A água quente que sai do conversor é bombeada para um permutador água/ar.

O sistema de travagem da TE é formado por dois subsistemas, o subsistema aerodinâmico e o subsistema mecânico. O subsistema de travagem aerodinâmico é do tipo individual por pá e de ativação elétrica. Um sistema auxiliar está disponível, para no caso de falha de energia os dispositivos de armazenamento serem ativados para rodar as pás perpendiculares à direção de rotação. O subsistema de travagem mecânico é do tipo travão de discos, com dois discos de 1 m de diâmetro, de metal, localizados no veio de alta velocidade. Em caso de emergência os discos são acionados hidráulicamente e exercem um momento resistente até à paragem do rotor. Depois da paragem do rotor é exercido pelos discos um momento resistente de valor duas vezes do momento nominal.

O sistema hidráulico fornece o óleo para acionar os discos do sistema travagem mecânica e travagem do sistema *Yaw*. A bomba hidráulica tem 1,5 kW de potência nominal e a quantidade de óleo hidráulico é aproximadamente 45 l do tipo VG 32.

O sistema de controlo operacional tem como principal função garantir uma operação automática e segura da TE em todas as situações através da supervisão e da manutenção dos parâmetros operacionais dentro de certos limites, os quais são armazenados no computador de controlo da TE. Os parâmetros operacionais são dados pela Nordex e são adaptados ao local da instalação. Enquanto a velocidade do vento for inferior a  $V_{cut\_in}$ , a TE é mantida em repouso (estado de poupança de energia), ou seja, apenas o computador funciona e recolhe dados. Todos os outros sistemas são desligados e não é necessária qualquer energia. Uma simples exceção é o sistema de travagem mecânica (bomba hidráulica tem que funcionar). Quando a velocidade do vento atinge  $V_{cut\_in}$ , a TE muda para o estado de 'preparada para funcionar'. Agora todos os sistemas são testados e a cabine é alinhada para a direção do vento. Se a velocidade do vento aumenta, o rotor acelera. Quando o rotor atinge uma determinada velocidade, o gerador é ligado à rede e a TE começa a produzir eletricidade. Durante o funcionamento da TE a cabine segue a direção do vento. A cabine é capaz de rodar 360° várias vezes. Mas se algum parâmetro operacional sai fora dos limites de funcionamento de segurança a TE é desligada e depois liga-se novamente. Quando a velocidade do vento atinge  $V_{cut\_out}$ , a TE desliga-se, as pás direcionam-se perpendiculares à direção do vento.

Sensores estão instalados em todos os sistemas e em muitos componentes da TE. Eles reportam o estado real para a unidade de controlo. Há valores limites de segurança para cada local de medição que devem ser mantidos. Se algum destes valores limite é excedido a unidade de controlo reage. Existem diferentes reações dependentes do parâmetro excedido. Por exemplo quando certos parâmetros de temperatura são excedidos, primeiro a bomba do sistema de



refrigeração é ligada. Se a temperatura desce novamente abaixo de determinado valor a bomba é desligada. Se um outro valor é excedido uma mensagem de aviso é enviada para o centro de controlo remoto da Nordex. O centro de controlo remoto da Nordex está *on-line* 24 horas por dia e sete dias por semana e eles podem decidir o que fazer usando os dados atuais da TE. Se a temperatura desce de novo abaixo de um certo valor, a mensagem de aviso desaparece. Quando é atingido um terceiro valor da temperatura a TE é desligada imediatamente. O terceiro valor limite para a temperatura é selecionado de forma a prevenir quaisquer danos na TE. Todos os seis valores limites pertencem a um único parâmetro e um único local de medição, três limites superiores de temperatura e três limites inferiores de temperatura.

Quando certos parâmetros de operação são excedidos a TE é desligada automaticamente. Dependentemente da causa da paragem existem diferentes procedimentos de paragem. Distúrbios exteriores à TE provocam procedimentos de paragem suaves (exemplo de uma falha na rede ou velocidade do vento superior a  $V_{cut\ off}$ ). Distúrbios de segurança internos e relevantes provocam procedimentos de paragem de emergência, para assegurar que o rotor desacelera rapidamente.

Os sensores são inquiridos a cada 40 ms. A partir destes dados o computador de controlo calcula os valores médios para períodos de 3 s, destes calcula os valores médios para períodos de 30 s e destes calcula os valores médios para períodos de 10 minutos. Estes valores médios são usados para controlar a TE. Para a velocidade do vento os valores médios para períodos de 30 s é relevante, porque outros valores médios de períodos mais curtos iriam desligar a TE cedo de mais ou com muita frequência devido à turbulência do vento. Para prevenir danos causados por rajadas curtas mas fortes o controlo também entra em conta com os valores médios para períodos de 3 s. Isto significa que a TE é desligada quando a velocidade do vento para períodos de 10 minutos excede os 25 m/s ou quando o valor médio da velocidade do vento para períodos de 3 s excede os 28 m/s.

## 2.2. Manutenção de TEs

A importância da manutenção das TEs pode inferir-se pela importância do impacto crescente destas na economia. Segundo a *World Wind Energy Association (WWEA, 2012)* a potência eólica instalada no mundo em 2011 era de 237,5 GW. Só no ano de 2011 foram instalados no Mundo cerca de 42,8 GW, dos quais 9,3 GW na Europa e 0,4 GW em Portugal. A Tabela 2.4 ilustra o crescimento da capacidade eólica no Mundo desde do ano de 1995.

Tabela 2.4 - Evolução da capacidade eólica no Mundo (WWEA, 2012)

Ano	Capacidade (GW)	Crescimento (GW)	Crescimento (%)
1995	4,8	-	-
1996	6,1	1,3	27,1
1997	7,5	1,4	22,7
1998	9,7	2,2	29,3
1999	13,7	4,0	64,3
2000	18,0	4,3	31,7
2001	24,3	6,3	34,9
2002	31,2	6,9	28,3
2003	41,4	10,2	32,7
2004	49,5	8,1	19,7
2005	59,1	9,7	19,6
2006	74,2	15,0	25,5
2007	94,0	19,8	26,7
2008	121,3	27,4	29,2
2009	158,0	36,7	30,3
2010	194,7	36,7	23,3
2011	237,5	42,8	22,0

O gráfico da figura 2.6 ilustra a evolução da capacidade eólica na Europa de 1997 a 2011. Em 2011 a potência eólica na Europa alcançou os 94,6 GW, cerca de 40 % da capacidade eólica Mundial. Pode-se observar que em 10 anos de 2002 a 2011 a potência eólica instalada na Europa quase quadruplicou de 24,0 para 94,6 GW.

O gráfico da figura 2.7 ilustra a evolução da capacidade eólica em Portugal. Em 2011 a potência eólica em Portugal alcançou os 4,1 GW, mais 10,2 % que em 2010. Pode-se observar que em 10 anos de 2002 a 2011 a potência eólica instalada em Portugal multiplicou-se 41 vezes, isto é passou de 100 MW em 2002 para 4.100 MW em 2011.

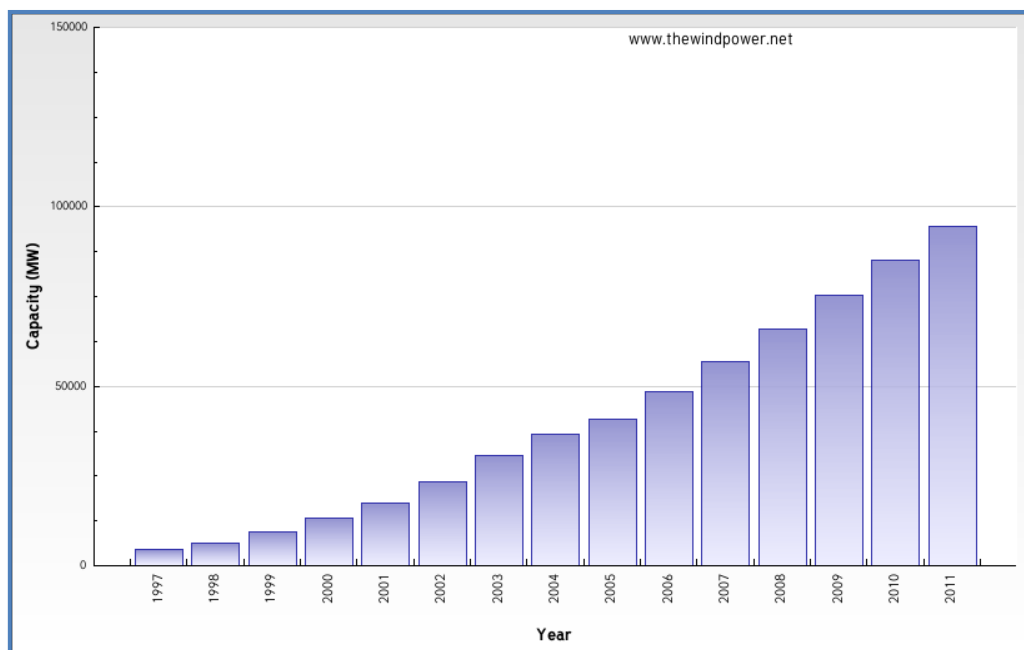


Figura 2.6 – Evolução da potência eólica instalada na Europa (WWEA, 2012)

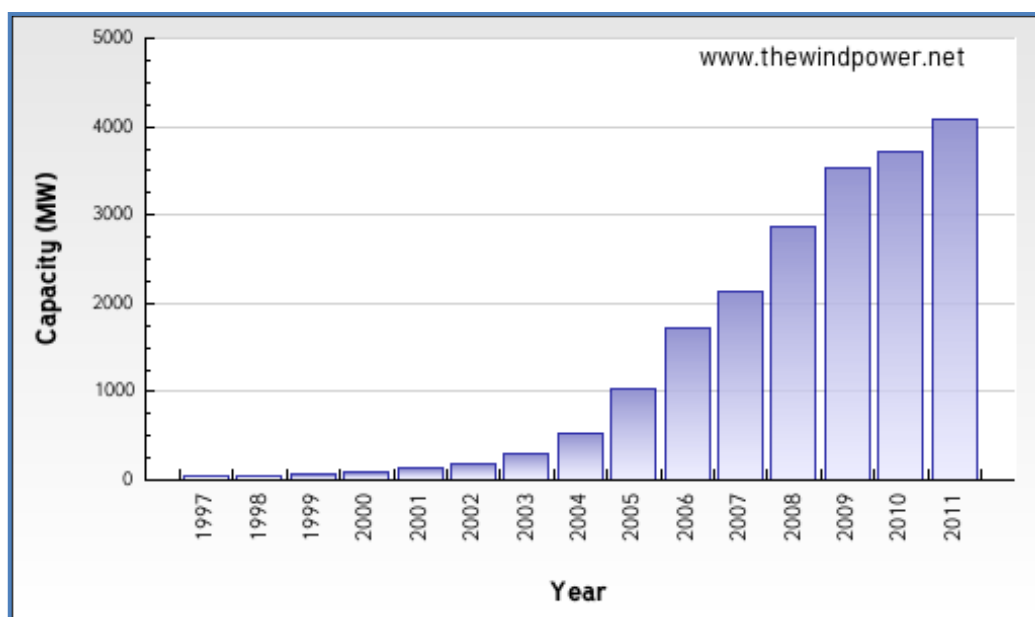


Figura 2.7 – Evolução da potência eólica instalada em Portugal (WWEA, 2012)

Segundo o relatório da *European Wind Energy Association* (EWEA, 2011) é estimado que a potência eólica instalada na Europa mais que duplique de 2010 para 2020, isto é, que passe de 81,4 GW em 2010 para 190 GW em 2020 (no cenário base). E em Portugal cresça de 3,9 GW em 2010 para 7,5 GW em 2020, com um crescimento médio anual de 0,36 GW, isto é o equivalente a instalar anualmente cerca de 180 TEs de 2 MW (como mostra a figura 2.8). No relatório também é estimado que a produção de eletricidade a partir do vento na Europa passe de 181,7 TWh em 2010 para 581,0 TWh em 2020 (no cenário base). E em Portugal cresça de 8,6 TWh em 2010 para 16,8 TWh em 2020 (no cenário base), o que corresponde à passagem de 15,5 % em 2010 para 28,1 % em 2020 de toda a eletricidade consumida.

Country	MW installed end 2010			MW installed end 2020: Baseline			MW installed end 2020: High			Average annual MW Baseline (2011-2020)	Average annual MW High (2011-2020)
Portugal	3,898	0	3,898	7,500	0	7,500	9,000	0	9,000	360	510
EU-27	81,380	2,944	84,324	190,000	40,000	230,000	210,000	55,000	265,000	14,568	18,068

Country	Electricity production end 2010 (TWh)			Electricity production end 2020: Baseline			Electricity production end 2020: High			Final electricity consumption 2008 (TWh)	Final electricity consumption 2020 (TWh)	Wind share 2010	Wind share 2020 Baseline	Wind share 2020 High
Portugal	8.6	0.0	8.6	16.8	0.0	16.8	20.2	0.0	20.2	55.4	59.7	15.5%	28.1%	33.8%
EU-27	171.1	10.6	181.7	432.7	148.2	581.0	478.3	203.8	682.1	3,390.7	3,689.5	5.3%	15.7%	18.4%

Figura 2.8 – Previsão da potência e produção eólica em 2020 na Europa e em Portugal (EWEA, 2011)

De acordo com o relatório do Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI, 2009) existiam perto de 2.000 TEs a operar em Portugal em 2009. Pode observar-se na figura 2.9 que a potência média das TEs instaladas tem aumentado ao longo dos anos e passou de  $\pm 500$  kW em 1998 para 1.800 kW em 2009.

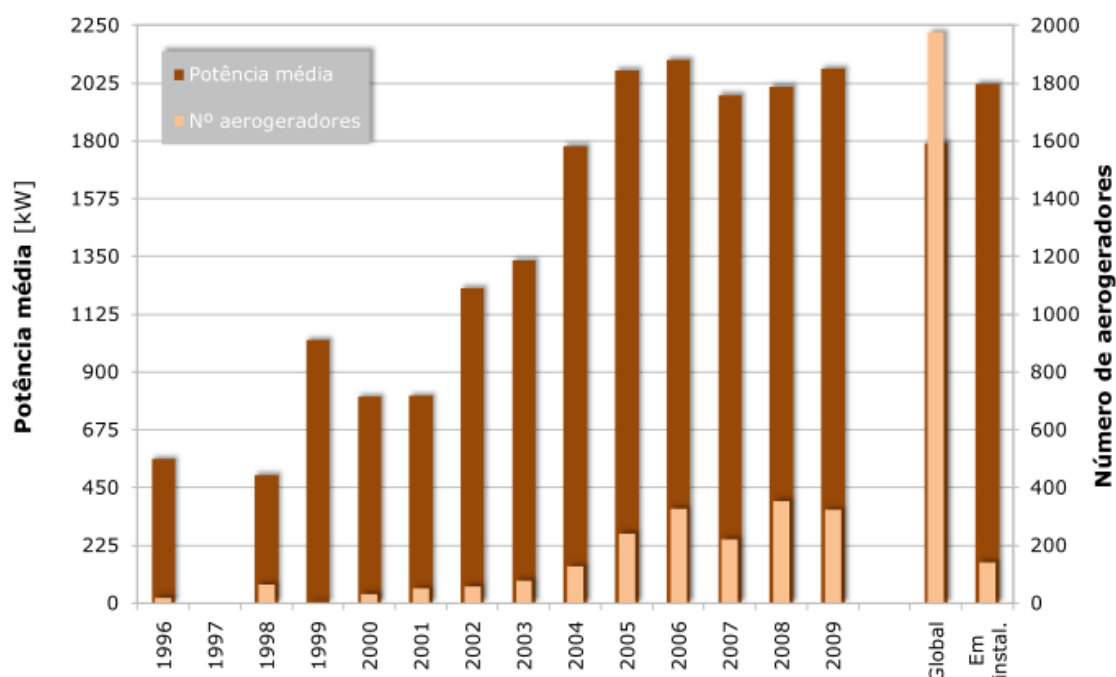


Figura 2.9 – Número de TEs e potência unitária média em Portugal (INEGI, 2009)

Pela observação da tabela 2.4 e dos gráficos anteriores pode concluir-se que a produção eólica e a manutenção das TE's vão ser cada vez mais importantes no futuro.

### 2.2.1. Principais conceitos da manutenção – manutenção, fiabilidade, disponibilidade, manutibilidade, *MTBF*, *MTTR* e taxa de avarias

O principal objetivo da gestão da produção e manutenção dos PEs é minimizar os custos totais por unidade de energia gerada durante a vida útil do ativo. Em termos gerais isto é conseguido através da redução dos custos de operação e de manutenção, do melhoramento do desempenho e da eficiência da TE, da redução dos riscos e dos custos dos seguros e da proteção dos ativos (EDP, 2010).

Segundo o estudo (EDP, 2010) os custos de operação e manutenção no total de custos do ciclo de vida de um PE são cerca de 22 %, o que é considerado um custo muito importante a ter toda atenção para a sua otimização, como se pode ver na figura 2.10.

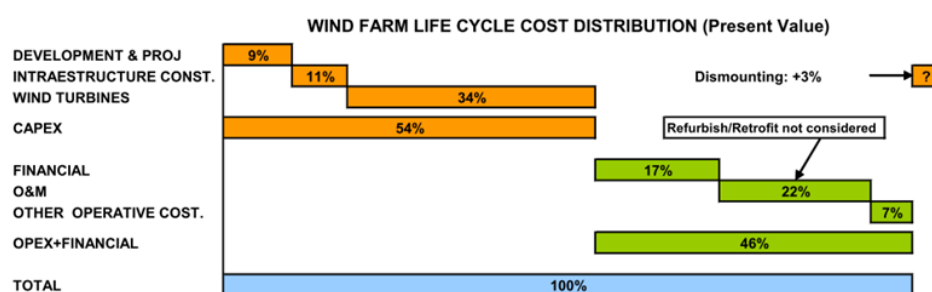


Figura 2.10 - Distribuição dos custos do ciclo de vida dos PEs (EDP, 2010)

De acordo com Instituto Português da Qualidade (NP EN 13306, 2007) a manutenção é a “combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que pode desempenhar a função requerida”.

A manutenção inclui como principais ações técnicas as reparações, as revisões, as inspeções e as ações de melhoria (de processos e/ou equipamentos e/ou componentes) destinadas a assegurar o bom funcionamento dos equipamentos (sistemas, subsistemas e componentes), garantindo a fiabilidade, a disponibilidade, a segurança e a qualidade de produção pretendida, tendo sempre em conta o fator económico (Hameed et.al, 2006).

O conceito de manutenção foi evoluindo ao longo dos tempos, sendo que o primeiro objetivo da manutenção é a restauração das funcionalidades dos utensílios.

A mecanização associada à Revolução Industrial do século XIX fez sobressair a necessidade de reparar regularmente as máquinas. Contudo essas intervenções eram deixadas a cargo dos próprios operadores (Farinha, 2011).

A partir da 1ª Guerra Mundial a indústria foi pressionada a atingir padrões mínimos de produção, levando à constituição de equipas especializadas para reparar as avarias no menor tempo possível. Porém, essas equipas limitavam-se a fazer manutenção corretiva (curativa) permanecendo dependentes do departamento da produção.

A partir da década de 30, com a produção em massa nos países industrializados, as empresas foram forçadas a produzir cada vez mais e começaram a preocupar-se, não só em corrigir as falhas, mas também em evitar o seu aparecimento. Assim os objetivos da manutenção

passaram a incluir a prevenção de anomalias. Em consequência o departamento de manutenção foi ganhando importância e autonomia.

A partir dos anos 40, com a expansão da aviação comercial, começaram a surgir os métodos preventivos, já que a reparação de avarias durante o voo raramente é possível e, por outro lado começa-se a dar mais importância à segurança de pessoas e bens. Surge assim a Engenharia e a Gestão da Manutenção que passa a ser incluída no organograma geral das organizações de modo a interagir com as outras funções (Pintelon, 1992), passando a ser desenvolvida como as outras funções das organizações, a ter indicadores e metas e contribuindo para o cumprimento dos objetivos específicos da organização (Márquez, 2009).

A partir da década 60, com a difusão dos computadores aparecem os primeiros modelos estatísticos e matemáticos aplicados na análise e controlo da fiabilidade dos equipamentos. Ainda nesta década, com o desenvolvimento da microeletrónica surgiram os instrumentos digitais de alta precisão para medir parâmetros de funcionamento e fazer diagnósticos precoces de avarias. Surge assim o conceito de manutenção condicionada e por consequência a manutenção preditiva, baseadas no acompanhamento sistemático dos sintomas de falha.

Nas últimas décadas foram surgindo novos conceitos e noções. Como por exemplo o conceito alargado de manutenção designado por Terotecnologia (do grego, “teros”, cuidar de – combinação de práticas de gestão, finanças, engenharia e outras, com o objetivo de conseguir os custos mínimos do ciclo de vida dos ativos físicos). A noção de manutenção produtiva total (*total productive maintenance, TPM*) que assenta muito na motivação do pessoal, no envolvimento de todos os departamentos e membros, desde a chefia superior até aos operários (Takahashi, 1981). O conceito de manutenção centrada na fiabilidade (*reliability centered maintenance, RCM*), que corresponde a uma abordagem da gestão industrial focada na identificação e estabelecimento de políticas e procedimentos de melhoria de manutenção e de investimentos de capital de modo a gerir mais eficazmente os riscos de falhas dos equipamentos. O conceito de manutenção baseada no risco (*risc based maintenance, RBM*), que se apoia nos cinco elementos nucleares do processo de gestão de risco (*risk management process, RMP*) que são a identificação, medida, nível de risco, estimação e controlo e monitorização (Farinha, 2011).

Os três principais indicadores em manutenção, que permitem avaliar a forma como os sistemas estão a cumprir a missão para que foram dimensionados são: a disponibilidade, a manutibilidade e a fiabilidade.

A disponibilidade é o parâmetro que nos dá a informação de quanto tempo, um determinado equipamento está disponível para realizar a operação/função para o qual foi confinado (Farinha, 2011).

A manutibilidade é a aptidão de um bem, sob condições de utilização definidas, para ser mantido ou restaurado, de tal modo que possa cumprir uma função requerida, quando a manutenção é realizada em condições definidas, utilizando procedimentos e recursos prescritos. Pode então ser caracterizada pelo grau de facilidade de acesso à inspeção, revisão, substituição ou reparação de componentes, podendo ser avaliada pelo tempo necessário para a manutenção do equipamento (Farinha, 2011).

A fiabilidade pode ser definida como o parâmetro de medida da capacidade de um sistema operar sem falhas, isto é, a probabilidade do sistema operar sem falhas. Os parâmetros mais usuais ligados à fiabilidade são o *MTBF* (*mean time between failures*) – tempo médio entre falhas - exprime o tempo médio de bom funcionamento, ou seja, o tempo que decorre, em média, entre duas falhas consecutivas e o *MTTR* (*mean time to repair*) – tempo médio de reparação - exprime o tempo médio necessário para reparar uma falha (Farinha, 2011).

O *MTBF* é um quantificador da fiabilidade dos sistemas, porque uma vez calculado, expressa a aptidão do sistema para funcionar durante um determinado período de tempo em boas condições.

O *MTTR* é uma medida da manutibilidade do equipamento, isto é, indica a aptidão do sistema para ser reparado.

A disponibilidade (D), calculada através da seguinte fórmula (Farinha, 2011):

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.2.1)$$

é igual a um quando o *MTBF* é infinito ou quando o *MTTR* é igual a zero. Nos restantes casos a disponibilidade é sempre inferior a um.

Outro parâmetro ligado à fiabilidade é a taxa de avarias ( $\lambda$ ) dado por (Farinha, 2011):

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (2.2.2)$$

é inversamente proporcional ao tempo médio entre falhas, portanto a taxa de avarias diminui quando o tempo médio entre falhas aumenta.

Outro parâmetro a ter em consideração na manutenção (principalmente em parques eólicos *offshore*) é o *MWT* (*mean waiting time*), que corresponde ao tempo médio de espera entre a identificação da avaria e o início da intervenção de manutenção corretiva. A quantificação deste parâmetro é importante porque permite distinguir entre o tempo intrínseco à intervenção e o tempo total que a mesma envolve. Nos parques eólicos *offshore* nos mares do norte, revoltosos e com más condições atmosféricas durante intervalos de tempo por vezes elevados, pode-se ter tempos de espera muito elevados, o que vai implicar tempos médios de reparação por vezes extremamente elevados, se as intervenções coincidirem nestes períodos de más condições atmosféricas.

### 2.2.2. Principais tipos de manutenção – corretiva e preventiva

De acordo com o Instituto Português da Qualidade (NP EN 13306, 2007) algumas das definições dos tipos e estratégias de manutenção são:

A manutenção corretiva – “Manutenção efetuada depois da deteção de uma avaria e destinada a repor um bem num estado em que pode realizar uma função requerida.”

A manutenção preventiva – “Manutenção efetuada a intervalos de tempo pré-determinados, ou de acordo com critérios prescritos, com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um bem.”

Existem essencialmente dois tipos de manutenção preventiva, a sistemática e a condicionada.

A manutenção sistemática – “Manutenção preventiva efetuada em intervalos de tempo pré-estabelecidos ou segundo um número definido de unidades de utilização mas sem controlo prévio do estado do bem.”

A manutenção condicionada – “Manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem e ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as

ações daí decorrentes.” - Consiste na monitorização de um dado equipamento, à observação de variáveis que permitem não só caracterizar o estado interno do equipamento, como também prever a tendência de evolução do mesmo. Deste modo, será possível evitar ações de manutenção desnecessárias e minimizar a probabilidade de ocorrência de falha. Destacam-se neste tipo de manutenção atividades como: controlo de vibração, de termografia, da monitorização elétrica, estudo do comportamento das superfícies em contacto, da monitorização dos rendimentos, ultrassom, quantidades de partículas, gases de escape, etc.

A manutenção preditiva – “Manutenção condicionada efetuada de acordo com as previsões extrapoladas da análise e da avaliação de parâmetros significativos da degradação do bem.” – Por exemplo a análise e extrapolação dos dados da potência elétrica da TE para avaliar o estado de degradação futuro da TE.

### **2.2.3. Manutenção condicionada e preditiva de TEs – vantagens e desvantagens**

Na manutenção condicionada ou manutenção por controlo de condição as ações são executadas de acordo com o estado de “saúde” do sistema/equipamento/objeto de manutenção. De uma forma geral, associam-se várias variáveis ao sistema, medidas numa dada unidade que quando atingem determinados limites dão origem a uma ação.

A manutenção condicionada é aplicada em diversos sectores de atividade, tais como aeronáutica, siderurgias, refinarias de petróleo, centrais nucleares, navios, equipamento militar, centrais térmicas e mais recentemente nas TEs.

O objetivo final da manutenção condicionada é conseguir ganhos, ao nível de incremento da fiabilidade (diminuir a taxa de avarias e aumentar o *MTBF*), da racionalização de custos, do aumento da disponibilidade e da manutibilidade (diminuir o *MTTR* e o *MWT*), do aumento da segurança da operação e da manutenção, da melhoria da qualidade na produção (menor instabilidade/variabilidade na produção) e do aumento da confiança nas TEs com a consequente redução de custos com os seguros.

As vantagens da manutenção preditiva são a previsão de falhas graves e a capacidade de evitar avarias catastróficas e as respetivas consequências, desde dos custos elevados da reparação (custos elevados de mão de obra, das peças/componentes de substituição e muitas vezes dos equipamentos auxiliares utilizados, como gruas) até ao tempo em que a TE está parada sem produzir energia elétrica. Outras vantagens são a possibilidade de permitir um melhor planeamento do sector da manutenção, desde a programação de ações para períodos de baixo vento, até à antecipação de ações como revisões ou inspeções ou substituição de peças para períodos que antecedem tempestades atmosféricas mais violentas que impossibilitem ações humanas durante períodos longos, principalmente em *offshore*. Melhoria da logística das peças de substituição (existem componentes como as caixas multiplicadoras ou as pás ou alguns rolamentos, que têm prazos de entrega elevados, podendo chegar a várias semanas) e dos equipamentos auxiliares da manutenção, como por exemplo, o aluguer de gruas pode ser feito com alguma antecedência evitando que quando chega o dia da ação planeada não existam gruas disponíveis, impossibilitando a respetiva reparação e alongando o período de inatividade da TE. Melhor coordenação das equipas de manutenção, aumentando a produtividade das mesmas, pois evita os períodos sem atividade e os períodos de excesso de trabalho e facilita a coordenação da contratação de serviços externos, bem como uma redução de custos com esses serviços, pois podem ser pedidos mais orçamentos e uma melhor negociação de condições. Outro aspeto importante é ser possível efetuar diversos diagnósticos à situação atual da TE e previsão de falhas sem adição extra de instrumentação, sem tempo de paragem do PE, sem custos extras e potenciais implicações de garantia, pois o diagnóstico e previsão de avarias resulta da análise dos dados *SCADA* do PE, isto é, a manutenção condicionada faz uso de

ferramentas/programas/modelos especialmente desenhados para fazer uma análise detalhada do desempenho das TEs ao longo do tempo, no momento atual e num futuro próximo com elevadas probabilidades de sucesso na previsão de falhas, pois permitem acompanhar a tendência do comportamento ao longo do tempo e prever o futuro. (WWEA, 2012) (Hameed et.al., 2006) (McLaughlin et.al., 2010).

Alguns estudos efetuados nos EUA pelo *Electric Power Research Institute (EPRI)* mostraram uma redução de custos totais com a manutenção de 47 % obtida usando as técnicas de manutenção preditiva, em comparação com a manutenção corretiva (reativa) na indústria eólica (WWEA, 2012). Mostrou também uma redução de custos de 30 % obtida usando as técnicas de manutenção preditiva, em comparação com a manutenção preventiva sistemática (WWEA, 2012).

Um relatório da *NWCC (National Wind Coordinating Committee)* concluiu que 75 % dos custos totais com a manutenção de TEs são relativos a intervenções não planeadas (corretivas), por isso existem enormes oportunidades para reduzir os custos de manutenção não programada das TEs através do uso das técnicas da manutenção preditiva, com um potencial de redução de custos de 50 % em média (WWEA, 2012).

A manutenção condicionada tem como desvantagem os custos elevados iniciais em tecnologia – sensores e restante equipamento de receção, armazenamento, tratamento e transmissão de dados. Isso está a começar a mudar, com o melhoramento da eletrónica de potência, com o aumento da potência das TEs, com a disseminação da produção, instalação e reduções de custos destes equipamentos e serviços (atualmente vêm instalados de série e fazem parte dos sistemas base das TEs), o aumento do número empresas no sector da manutenção que tem levado ao incremento da concorrência e ao abaixamento dos preços. Por outro lado, o desenvolvimento de PEs em *offshore* e em sítios mais remotos também aumenta a viabilidade da manutenção preditiva, pois os custos de acesso aos locais são significativamente mais elevados e as condições atmosféricas mais agrestes, o que implica maiores exigências de planeamento e gestão ao sector da manutenção (WWEA, 2012).

A manutenção condicionada preditiva para além dos aspetos anteriores tem como principal desvantagem de não ser independente, isto é, é um tipo de manutenção que não vem substituir os outros tipos de manutenção, é uma ferramenta que assinala que a TE pode vir a ter uma avaria grave daqui a alguns dias ou semanas mas não indica que órgão ou sistema vai avariar, exige sempre que se tomem outras ações de manutenção para detetar a futura avaria, portanto é mais uma ferramenta que deve ser explorada com mestria pelo setor da manutenção (WWEA, 2012).

#### **2.2.4. Métodos de monitorização e variáveis de controlo**

As modernas técnicas de manutenção condicionada de instalações e equipamentos implicam a utilização de vários métodos de monitorização, nos quais assumem particular importância:

A análise de vibrações, através do uso de sensores de vibração aplicados a variados órgãos com movimento rotativo a monitorizar, como por exemplo: as pás, os veios e os rolamentos do eixo principal e secundário, a caixa multiplicadora e alguns dos seus componentes (rolamentos e veios), o gerador e alguns dos seus componentes (rolamentos, rotor e estator) (Hameed et.al, 2006).

A análise de lubrificantes, por um lado para salvaguardar a qualidade do óleo (quantidade de partículas, humidade, oxidação) e por outro salvaguardar os componentes envolvidos. *On-*



*line* podem ser usados sensores para detecção de humidade e de partículas. *Off-line* são feitas recolhas de amostras dos vários óleos a intervalos pré-definidos e posterior análise em laboratórios especializados. Esta técnica é muitas vezes aplicada como suporte ou como confirmação de desgaste excessivo de determinados componentes (Hameed et.al, 2006).

O controlo de variáveis individuais como as pressões dos óleos do motor, da caixa multiplicadora e do sistema hidráulico, as temperaturas de funcionamento de determinados óleos e de determinados componentes como rolamentos e veios (Caselitz at.al.).

A análise de dissipação de energia, através da termografia, é uma técnica que parte do princípio da transmissão de calor por radiação, é não destrutiva e utiliza os raios infravermelhos para medir temperaturas ou observar padrões diferenciais de distribuição de temperatura, com o objetivo de propiciar informações relativas à condição operacional de um componente, equipamento ou processo. Pode ser usada para verificar o aquecimento de rolamentos, caixa de velocidades, gerador, transformador, bombas e motores hidráulicos e especialmente para verificar aquecimentos anormais (pontos quentes) em instalações elétricas. Permite realizar medições sem contato físico com a instalação (com segurança), verificar equipamentos em pleno funcionamento (sem interferência na produção) e inspecionar grandes superfícies em pouco tempo (alto rendimento). Uma câmara de imagens térmicas (Figura 2.11) apresenta uma imagem que usa diferentes cores para representar diferentes temperaturas. Esta imagem permite uma verificação visual da temperatura de superfícies e uma identificação de pontos quentes de forma rápida. Frequentemente, os pontos quentes ou uma subida na temperatura indicam uma avaria iminente (Hameed et.al, 2006).

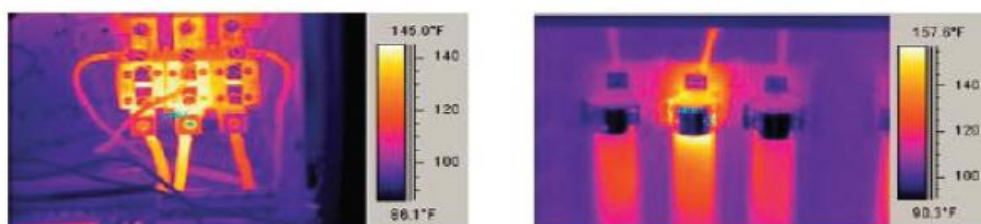


Figura 2.11 - Inspeção termográfica de ligações elétricas e de um grupo de fusíveis com pontos quentes (fonte: *"Instalaciones Solares Fotovoltaicas"*, Miguel Moro Vallina, Paraninfo)

O controlo de variáveis do processo produtivo, como por exemplo o controlo das tensões, das correntes e da potência elétrica das TE's, normalmente estas técnicas dependem muito do modo de cálculo e de comparação (Llombart, 2005). Exigem algoritmos muito robustos mas, por si só, não identificam a origem da falha embora possam ser o primeiro sinal de previsão de falhas. Se é diagnosticado e previsto um estado de descontrolo estatístico deve planear-se e executar ações de forma a restabelecer a estabilidade do processo (Kusiak, 2010), (Uluyol at.al, 2011).

A análise acústica dos sons emitidos por exemplo pelos principais rolamentos e pela caixa multiplicadora (Hameed et.al, 2006).

A análise de tensões e deformações, através da medição da resistência elétrica em extensómetros ligados por exemplo às superfícies das pás (Hameed et.al, 2006).

Exame visual, auxiliar de outras técnicas para uma confirmação mais específica da origem da falha, pode fazer uso de mini câmaras para examinar por exemplo o interior dos geradores e das caixas multiplicadoras.

De um modo geral, nenhuma das técnicas de controlo de condição pode ser considerada como absolutamente suficiente. Na realidade uma técnica pode cobrir uma larga gama de

potenciais causas de avaria mas, em geral, não é suficiente para garantir a deteção de todas as causas de degradação possíveis, daí que normalmente haja sempre complementaridade com outras técnicas (WWEA, 2012).

Nesta dissertação é aplicada a técnica do controlo de uma variável do processo produtivo, que é a potência elétrica da TE através das variáveis desempenho e eficiência, como se pode ver esquematicamente na figura 2.12. O acompanhamento desta variáveis de controlo assenta na definição de um diferencial inaceitável entre o estado de operação de referência/teórico da TE versus estado de resposta atual/real da TE.

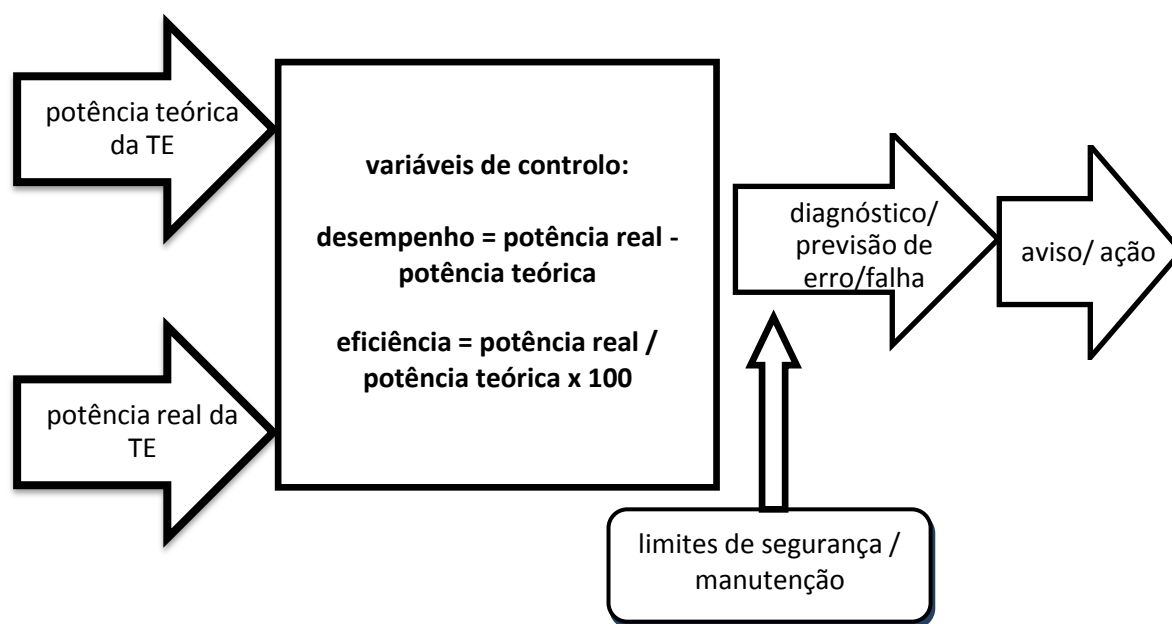


Figura 2.12 – Método de deteção e previsão de anomalias através das variáveis desempenho e eficiência de TEs (Hameed et.al., 2006)

A fase inicial é de verificação da curva de potência teórica do fabricante e da definição dos limites de controlo (segurança/manutenção). Na fase de produção normal sempre que os limites de segurança/manutenção são atingidos ou é previsto que sejam atingidos, num futuro próximo, são produzidos avisos, relatórios, gráficos e de acordo com esses avisos é necessário planear e executar ações técnicas, como análises a outras variáveis de controlo, inspeções ou mesmo ações de reparação ou de melhoria da TE. Essas ações são destinadas a assegurar o bom funcionamento da TE, garantindo a fiabilidade, a disponibilidade, a segurança e a qualidade de produção pretendida, tendo sempre em conta o fator económico (Hameed et.al, 2006).

### 2.2.5. Otimização da manutenção – sistema SCADA

A otimização da manutenção é um processo que tenta equilibrar os objetivos da manutenção (legislativos, económicos, técnicos, segurança, qualidade) e os recursos disponíveis para realizar as funções da manutenção (pessoas, peças de substituição, consumíveis, equipamentos, instalações, contração de serviços externos). É um processo contínuo que requer uma avaliação periódica e melhoramento dos aspetos menos positivos (Iberwind, 2012).

O principal objetivo da otimização da manutenção é determinar a estratégia mais eficaz para reduzir o custo total do ciclo de vida das TEs (Andrawus, 2008). A estratégia constitui em otimizar o equilíbrio entre os custos de manutenção direta (trabalho, materiais, administração)

e os custos da não realização da manutenção conforme o necessário (perda de produção, trabalho, materiais, administração), sem prejuízo para a saúde, segurança e ambiente.

A realização de atividades de manutenção, como inspeções, revisões com mais frequência e a utilização de uma maior quantidade de técnicas de manutenção preditiva, aumenta os custos diretos de manutenção – curva a amarelo dos custos diretos da manutenção na figura 2.13. Assim como, diminui a exposição ao risco ou às consequências da não realização das atividades de manutenção necessárias, aumentando a disponibilidade e por isso a produção e consequentemente os lucros da exploração dos PEs – curva a rosa da perda de rendimentos na figura 2.13. A otimização lida com a interação entre estes fatores e visa determinar o nível ótimo. Isso geralmente é obtido no ponto mais baixo da curva do custo total da figura 2.13, da combinação da curva dos custos diretos da manutenção com a curva da perda de rendimentos.

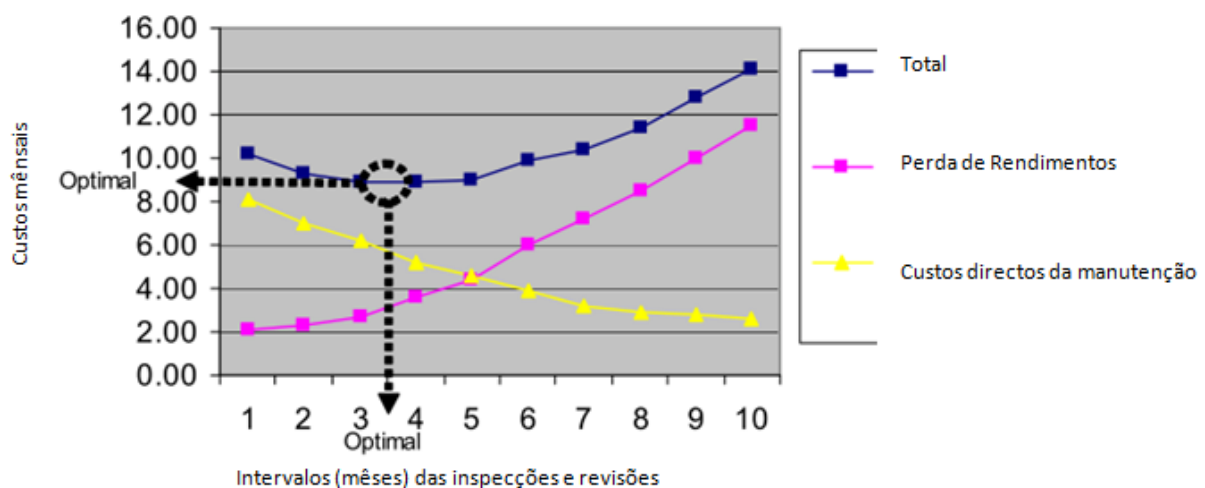


Figura 2.13 - Conceito de otimização de manutenção (EDP, 2010)

O sistema *SCADA* tem como funções adquirir e guardar em memória os dados enviados por todos os sensores. E quando necessário transmitir esses dados (por cabo ou por satélite como ilustra a figura 2.14) para a central de gestão e manutenção para a sua análise.



Figura 2.14 - Transmissão por satélite dos dados do *SCADA* (SKF, 2012)

Na central de gestão e manutenção os dados do SCADA são armazenados numa base de dados e depois podem ser exportados para programas informáticos (executados por exemplo em MATLAB) para serem visualizados e analisados.

Uma das aplicações desses programas informáticos pode ser a análise das variáveis de controlo do desempenho e da eficiência da TE. A partir dessas análises podem ser retiradas algumas ilações, como por exemplo: a TE está em bom estado de funcionamento, de acordo com o previsto pelo fabricante da TE; a TE está com alguma perda de desempenho e eficiência devida ao desgaste de algum componente; ou a TE está em muito mau estado de funcionamento e a precisar de uma intervenção urgente.

Estes programas fornecem também representações gráficas dos dados obtidos e das análises efetuadas como, por exemplo, da tendência do desempenho e da eficiência da TE para as próximas semanas ou para os próximos dias e relatórios do estado de “saúde” da TE no passado, no presente e para o futuro. Informam se a TE está ou não em bom estado de funcionamento e se a tendência é para continuar com funcionamento normal ou se é necessário alguma ação de manutenção (EDP, 2010).

Os diagnósticos e os prognósticos feitos pelos programas podem dar origem à emissão de avisos e quando um aviso ocorre o responsável pela manutenção deve declarar que está ciente do problema e iniciar o processo de eliminação da ocorrência e de restaurar as condições base de bom funcionamento. De seguida o responsável pela manutenção da TE pode fundamentar a mensagem de aviso com a análise de outras variáveis de controlo para determinar com mais exatidão que tipo de falha se trata (elétrica, mecânica, eletrónica), da criticidade da mesma e da localização da mesma (no sistema das pás, na transmissão, no hidráulico, no gerador, no controlo, etc.). Ou pode emitir uma ordem para efetuar uma inspeção mais rigorosa ao sistema onde está prevista a avaria, por um técnico especializado interno ou externo à organização. Ou pode emitir uma ordem de reparação imediata, de substituição de algum componente ou a mudança de algum óleo, filtro ou sensor (Farinha, 2011).

#### **2.2.6. Principais avarias em TEs**

As avarias típicas em TEs podem ser divididas em elétricas, eletrónicas e mecânicas (Brandao at.al., 2008).

As falhas eletrónicas são as que ocorrem com mais frequência devido principalmente às descargas elétricas nos relâmpagos e a outros fenómenos naturais que destroem os sensores e as placas dos circuitos eletrónicos. A solução normal é substituir os componentes eletrónicos danificados por novos. Os tempos em média associados às reparações deste tipo de falhas são os mais baixos, um a dois dias, como se pode ver na figura 2.15.

As falhas elétricas ocorrem com alguma frequência, são inesperadas e têm tempos em média de reparação baixos de dois dias, como se pode ver na figura 2.15.

As falhas mecânicas são as que ocorrem com menos frequência, são associadas à caixa multiplicadora, ao sistemas do rotor, ao sistemas *Yaw* (sistema de orientar a cabine em relação à direção do vento), ao sistema *Pitch* (sistema de controlo do ângulo de passo) e ao sistema hidráulico, mas os tempos em média de reparação são os mais elevados, nos geradores de oito dias e na caixa multiplicadora de sete dias, como se pode ver na figura 2.15.

Na análise realizada a um PE Português com treze TEs conclui-se que quase 80 % do tempo de paragem das TEs é devido a ações não planeadas (corretivas), como por exemplo, a substituição de componentes avariados devido ao desgaste ou à rutura (Brandao at.al., 2008).

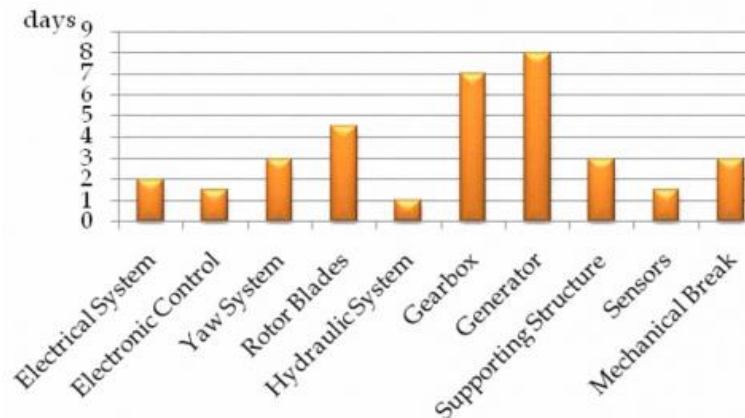


Figura 2.15 – Tempo de reparação por falha (Brandao at.al., 2008)

Nos estudos de frequências e tempos de paragem de falhas em TEs divulgados em (Carlsson at.al., 2010) observa-se que as falhas que ocorrem com mais frequência verificam-se no sistema de controlo eletrónico, nos sensores, no rotor, no sistema de *Yaw*, no sistema elétrico e no sistema hidráulico. As falhas que provocam tempos de paragem maiores verificam-se na caixa multiplicadora, no rotor, no sistema de transmissão, no gerador e no sistema *Yaw*.

## 2.3. Análise estatística dos dados

Uma TE em operação gera grandes quantidades de dados. Os dados do sistema *SCADA* contêm informações sobre todos os aspetos da TE, desde a potência real até à velocidade e direção do vento.

Nesta dissertação os dados do sistema *SCADA* vão ser usados para diagnosticar o estado passado e atual da TE e para prever possíveis avarias, através da análise da tendência das variáveis de controlo desempenho e eficiência. Estas variáveis resultam da comparação da potência real com a potência teórica garantida pelo fabricante que a TE devia ter para determinadas condições atmosféricas.

### 2.3.1. Variável de controlo - desempenho

Em algumas metodologias propostas nesta dissertação, para análise de dados de TEs, usa-se como variável de controlo, o desempenho, que é a diferença entre a potência real da TE (fornecida pelo sistema *SCADA*) e a potência teórica calculada através da curva de potência de referência teórica do fabricante e da velocidade do vento normalizada (para a MV de referência do ar):

$$DES_{(10min)} = Pr_{(10min)} - Pt_{(10min)} \quad (2.3.1)$$

A partir da análise da variável desempenho, ao longo do tempo, pode retirar-se uma das várias conclusões:

- a TE esteve e está funcionar otimamente se o desempenho é nulo ao longo do tempo, ou seja, a potência real é igual à potência teórica;
- a TE esteve a funcionar normalmente até determinado momento e depois o desempenho começou a baixar;
- a TE vai atingir as barreiras dos -5 % e -10 % de perda de desempenho daqui a algumas semanas ou dias;
- a TE entra em perda de desempenho a partir de certa velocidade do vento;

### 2.3.2. Variável de controlo - eficiência

A eficiência da TE é a razão entre a potência real (fornecida pelo sistema *SCADA*) e a potência teórica calculada através da curva de potência de referência teórica do fabricante (para a MV de referência do ar) e da velocidade do vento normalizada (para a MV do ar de referência):

$$\eta_{(10\min)} = \frac{Pr_{(10\min)}}{Pt_{(10\min)}} \times 100 (\%) \quad (2.3.2)$$

A partir da análise da variável eficiência, ao longo do tempo, pode retirar-se uma das várias conclusões:

- a TE esteve e está funcionar otimamente se a eficiência é 100 %;
- a TE esteve a funcionar otimamente até determinado momento e depois começou a funcionar pior (eficiência menor que 100 %);
- a TE tem uma eficiência menor do que a prevista pelo fabricante;
- a TE tem uma eficiência menor para algumas velocidades do vento;
- a TE vai atingir as barreiras dos 95 % e 90 % de eficiência daqui a algumas semanas ou dias;

### 2.3.3. Métricas de análise usadas nas metodologias

As métricas de análise usadas foram:

- a potência real, a potência teórica, o desempenho e a eficiência calculada para períodos de 10 minutos;
- como medidas de localização foram usadas as médias aritméticas do desempenho e da eficiência (por semana e por dia);
- como medidas de dispersão foram usados os desvios padrão do desempenho e da eficiência (por semana e por dia);
- como medidas de previsão foram usadas as retas de regressão linear das médias e dos desvios padrão do desempenho e da eficiência (por semana e por dia) das últimas 52, 12 e 6 semanas ou dos últimos 31 e 12 dias;

### 2.3.4. Métrica de localização – média (por hora, dia e semana)

A média aritmética horária, ou simplesmente média de seis dados de períodos de 10 minutos da variável desempenho é o número real:

$$DES_{(hora)} = \frac{\sum_{i=1}^{I=6} DES_{(10\min)}}{6} \quad (2.3.3)$$

A média aritmética diária, ou simplesmente média de 144 dados de períodos de 10 minutos da variável DESEMPENHO é o número real:

$$DES_{(dia)} = \frac{\sum_{i=1}^{i=144} DES_{(10\min)}}{144} \quad (2.3.4)$$

A média aritmética semanal, ou simplesmente média de 1008 dados de períodos de 10 minutos da variável DESEMPENHO é o número real:

$$DES_{(semana)} = \frac{\sum_{i=1}^{i=1008} DES_{(10\min)}}{1008} \quad (2.3.5)$$

As médias representam o centro de desempenho da TE, isto é, se as médias tiverem o valor zero significa que a TE está a funcionar normalmente, mas se as médias apresentarem valores negativos significa que a TE está com uma produção inferior à normal. Portanto o valor das médias (horárias, diárias e semanais) do desempenho podem e devem ser um sinal de que algum sistema ou órgão da TE está com tendência de avaria, sendo necessário analisar outras variáveis de controlo e tentar detetar qual o sistema a falhar para emitir uma inspeção ou ordem de reparação a esse sistema.

### 2.3.5. Métrica de dispersão – desvio padrão (por hora, dia e semana)

O desvio padrão de uma amostra de tamanho  $n < 30$  e de média  $\bar{x}$  é dado por:

$$\sigma = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right)^{1/2} \quad (2.3.5)$$

O desvio padrão de uma amostra de tamanho  $n > 30$  e de média  $\bar{x}$  é dado por:

$$\sigma = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \right)^{1/2} \quad (2.3.6)$$

Para valores próximos de zero do desvio padrão do desempenho (por dia e por semana) indicam que os valores do desempenho (para períodos de 10 minutos) estão próximos da média, havendo fraca dispersão. Quando o desvio padrão aumenta e a média se mantém igual significa que a dispersão aumentou e os valores do DES<sub>(10min)</sub> estão a afastar-se da média. Sendo um sinal de que alguma coisa na TE está a começar a funcionar pior.

### 2.3.6. Os métodos de previsão e análise de séries temporais

Os métodos de previsão de avarias utilizam séries temporais, que correspondem a um conjunto de observações ordenadas no tempo (Aubyn et.al, 2011).

O processo de previsão pode ser dividido em dois passos:

1. Estudo, visualização gráfica e determinação do modelo da série – isto é, descrever a série a partir dos seus dados;
2. Previsão da série – isto é, a partir dos valores passados, fazer previsões adequadas para o futuro.

A forma tradicional de analisar as séries temporais é através da sua decomposição, nas componentes de tendência, ciclo, sazonalidade e flutuações irregulares: a tendência indica o comportamento da série de “longo prazo”; o ciclo indica padrões que se repetem na série em períodos superiores a um ano; a sazonalidade indica a repetição de um padrão na série dentro de um período específico; e as flutuações irregulares indicam variações de curta duração, de natureza aleatória, que são completamente inexplicáveis.

Alguns dos algoritmos utilizados na previsão de diversas séries temporais são os seguintes: Médias móveis (*moving average*, MAS) – alisamento da série (eliminação das flutuações irregulares) para se obter a tendência; Alisamento exponencial (*exponential smoothing*, ES) - alisamento da série baseada na ideia intuitiva que os acontecimentos mais recentes são mais importantes que os de um passado mais afastado; Alisamento exponencial com resposta adaptativa simples (*adaptive response rate single exponential smoothing*, ARSES); Alisamento exponencial de *Holt-Winters* (HWSas para o método com sazonalidade e HM para o método sem sazonalidade) (Aubyn et.al, 2011); Auto-regressão da média móvel

(*autoregressive moving average*, ARMA) (Castro, 2011) – modelos lineares; As redes neurais artificiais (*artificial neural networks*, ANN) – modelos não lineares, que permitem simular o pensamento humano e a sua capacidade de adaptação a problemas complexos, em como a aprendizagem pela experiência; e Extrapolação polinomial das médias semanais (do último ano) para as próximas semanas e extrapolação polinomial das médias diárias (do último mês) para os próximos dias (Farinha, 2011).

Os algoritmos utilizados nas metodologias de previsão propostas foram as extrapolações polinomiais (de 1ª, 2ª, 3ª ordem) das médias e dos desvios padrão semanais (do último ano) ou das médias e dos desvios padrão diários (do último mês), baseada na hipótese de que a tendência (“função polinomial”) obtida com as observações da série se mantêm no futuro próximo, isto é considera-se a ausência de qualquer acontecimento anormal como choque, rotura ou avaria num dos sistemas ou órgãos da TE.

### 2.3.7. Filtros de dados para TEs

Para aumentar a precisão nas análises à performance das TEs é necessário usar filtros para eliminar os *inputs* inválidos.

Os *inputs* principais na análise de performance das TEs são os dados *SCADA* da velocidade normalizada do vento e da potência real. Como o *input* da potência real é a média da potência real medida durante 10 minutos, tem-se que assegurar que a TE trabalhou normalmente durante esses 10 minutos. Em outros casos, os *inputs* não representam o funcionamento normal da TE e não podem ser considerados nos diagnósticos e prognósticos às TEs.

Existem várias técnicas de filtragem: usando os parâmetros de alarme de falhas do sistema *SCADA*, em que são eliminados todos os *inputs* que estejam associados a períodos com algum tipo de falha associada; usando o método estatístico clássico, é calculada a média ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) da diferença entre a potência real e a teórica para períodos de 10 minutos, depois são eliminados todos os *inputs* que são superiores a  $\mu + 3 \sigma$  ou inferiores a  $\mu - 3 \sigma$ ; ou combinando vários destes filtros (Llombart et.al, 2005).

Nas metodologias 5 e 6 aplica-se um método semelhante ao clássico. Primeiro considera-se que, em funcionamento normal, as TEs têm eficiência de 100 % ou muito próximo. De seguida é calculada a potência teórica para períodos de 10 minutos, depois a diferença entre a potência real e teórica e por fim são eliminados todos os *inputs* cuja eficiência é superiores a 120 % ou inferiores a 80 %, ou seja, são eliminados todos os *inputs* cuja potência real é superior a 120 % ou inferior a 80% da potência teórica.



## Capítulo 3 - Metodologias para análise do desempenho e previsão de avarias em TE utilizando a curva de potência do fabricante

O presente capítulo expõe as várias metodologias adotadas. A metodologia 1 é usada para calcular a massa volúmica de referência e a curva de potência de referência de uma TE, num determinado período de tempo e sujeita a condições meteorológicas específicas (temperatura e pressão). A metodologia 2 é utilizada para calcular alguns parâmetros de funcionamento da TE para um período de um ano (tais como a energia real produzida, a energia teórica que devia produzir, o desempenho, a eficiência, o rendimento, o fator de utilização e a produtividade - por ano, por mês, por direção e em função da velocidade do vento). As metodologias 3 e 4 (sem filtros) são usadas para analisar a variação do desempenho da TE nas últimas 52 semanas, prever as próximas 5 semanas, dos últimos 31 dias e prever os próximos 7 dias. Por fim as metodologias 5 e 6 (com filtros) são utilizadas para analisar a variação da eficiência da TE nas últimas 52 semanas, prever as próximas 5 semanas, dos últimos 31 dias e prever os próximos 5 dias, para as velocidades do vento de 6, 8, 10 e 12 m/s.

### 3.1. Metodologia 1 - calcular $\rho_{(ref)}$ e a curva de potência de referência de uma TE

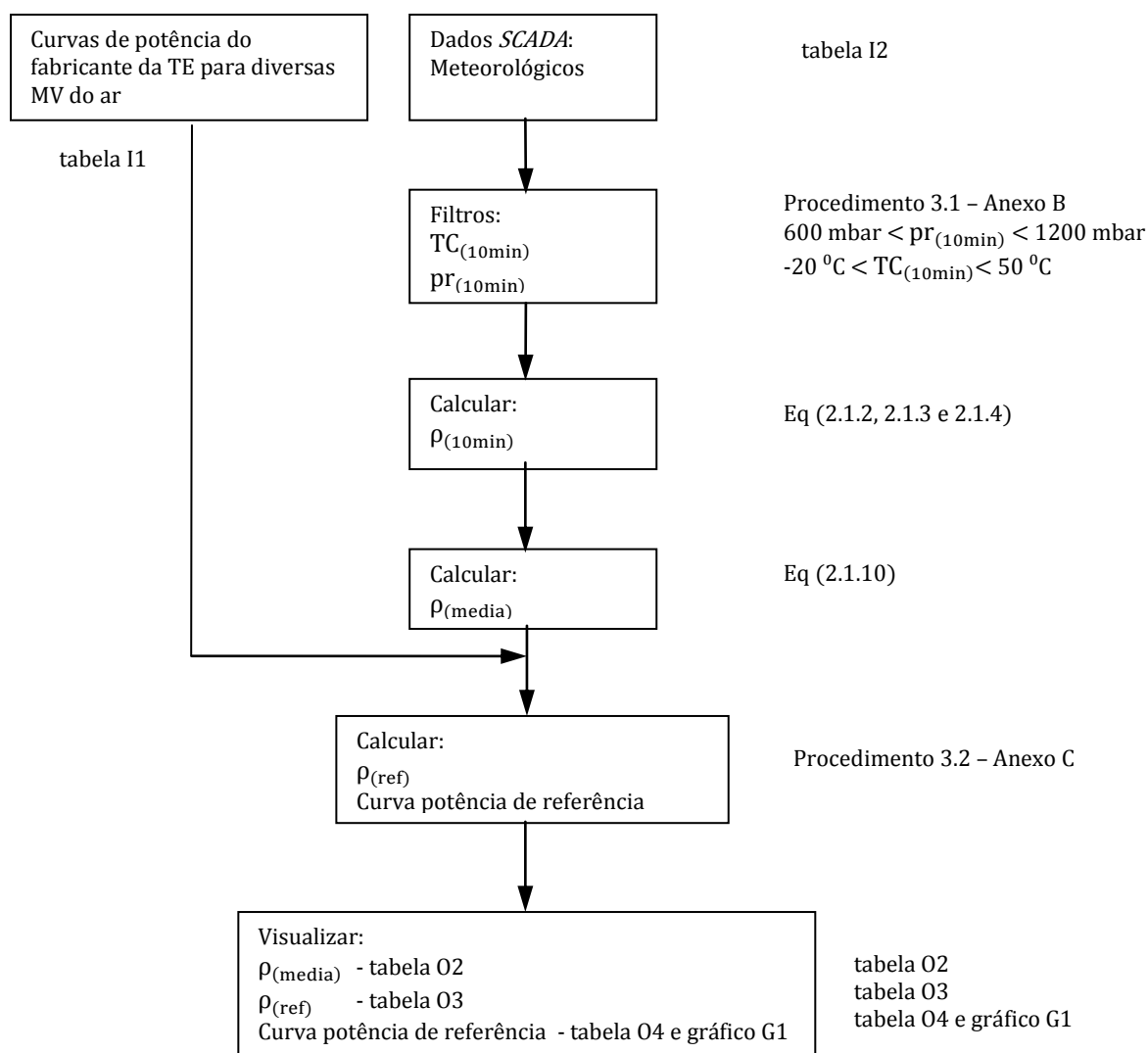


Figura 3.1 - Metodologia 1 para calcular  $\rho_{(ref)}$  e a curva de potência de referência de uma TE

A figura 3.1 mostra o esquema das principais etapas para o cálculo da massa volúmica de referência e da curva de potência de referência de uma TE. Os *Inputs* são os dados meteorológicos do SCADA ( $pr_{(10min)}$  - pressão média do ar medida para um período de 10 minutos (mbar), e  $TK_{(10min)}$  - temperatura média do ar medida para um período de 10 minutos (K)) do local onde estão instaladas as TEs e os dados das curvas de potência garantidas pelo fabricante das TEs, semelhantes aos apresentados no anexo A – curvas de potência da turbina eólica Nordex N90 para diferentes MV de ar.

A segunda etapa, logo a seguir à leitura dos dados, é a filtragem dos dados meteorológicos. São adotados dois filtros, um filtro para a pressão, em que as pressões menores que 600 mbar ou maiores que 1200 mbar não são consideradas e um filtro para a temperatura, em que as temperaturas menores que -20 °C ou maiores que 50 °C não são consideradas – procedimento 3.1 anexo B.

De seguida é calculada a MV média do ar para períodos de 10 minutos ( $\rho_{(10min)}$ ) de acordo com as equações 2.1.2, 2.1.3 e 2.1.4.

Segue-se o cálculo da MV média do ar para o período total ( $\rho_{(media)}$ ) de acordo com a equação 2.1.10.

A quinta fase consiste na determinação da MV de referência e da curva de potência de referência através do procedimento 3.2 anexo C. Este procedimento em MATLAB está de acordo com o subcapítulo 2.1.5. normalização sobre a MV do ar de referência a utilizar que deve ser a MV do ar de referência do fabricante que mais se aproxima da MV média do ar para o período total ( $\rho_{(media)}$ ).

Por fim são atualizadas as tabelas *massa\_volumica\_media*, *massa\_volumica\_referencia*, *curva\_potencia\_referencia* e é desenhado o gráfico da figura 2.3 – curvas de potência da TE Nordex N90 para diferentes MV do ar.

### **3.2. Metodologia 2 – calcular parâmetros de funcionamento da TE (por ano, por mês, por direção e em função da velocidade do vento) para um período de um ano**

A figura 3.2 mostra o esquema das principais etapas para o cálculo de alguns indicadores de gestão de TE. São analisados dados relativos a um ano de uma TE. Os *inputs* são os dados meteorológicos do SCADA ( $pr_{(10min)}$ ,  $TK_{(10min)}$  e  $V_{(10min)}$ ) do local onde está instalada a TE, os dados da potência real da TE obtidos do SCADA ( $Pr_{(10min)}$ ) e os dados da curva de potência de referência garantida pelo fabricante da TE e a massa volúmica de referência calculada anteriormente ( $\rho_{(ref)}$ ). Os *outputs* são gráficos e tabelas para melhor visualizar os parâmetros calculados.

O primeiro passo é ler os *inputs*. Depois calcular os parâmetros a analisar ( $\rho$ ,  $V_n$ ,  $P_t$ ,  $DES$ ,  $\eta$ ,  $Et$ ,  $Er$ ,  $Ev_n$ ,  $REND$ ,  $FU$ ,  $PROD$ ,  $DES_{energia}$ ) para períodos de 10 minutos e de seguida calcular os parâmetros a analisar por ano, por mês, por direção e em função da velocidade do vento.

Por fim podesse visualizar as tabelas e os gráficos de saída dos parâmetros calculados a analisar.

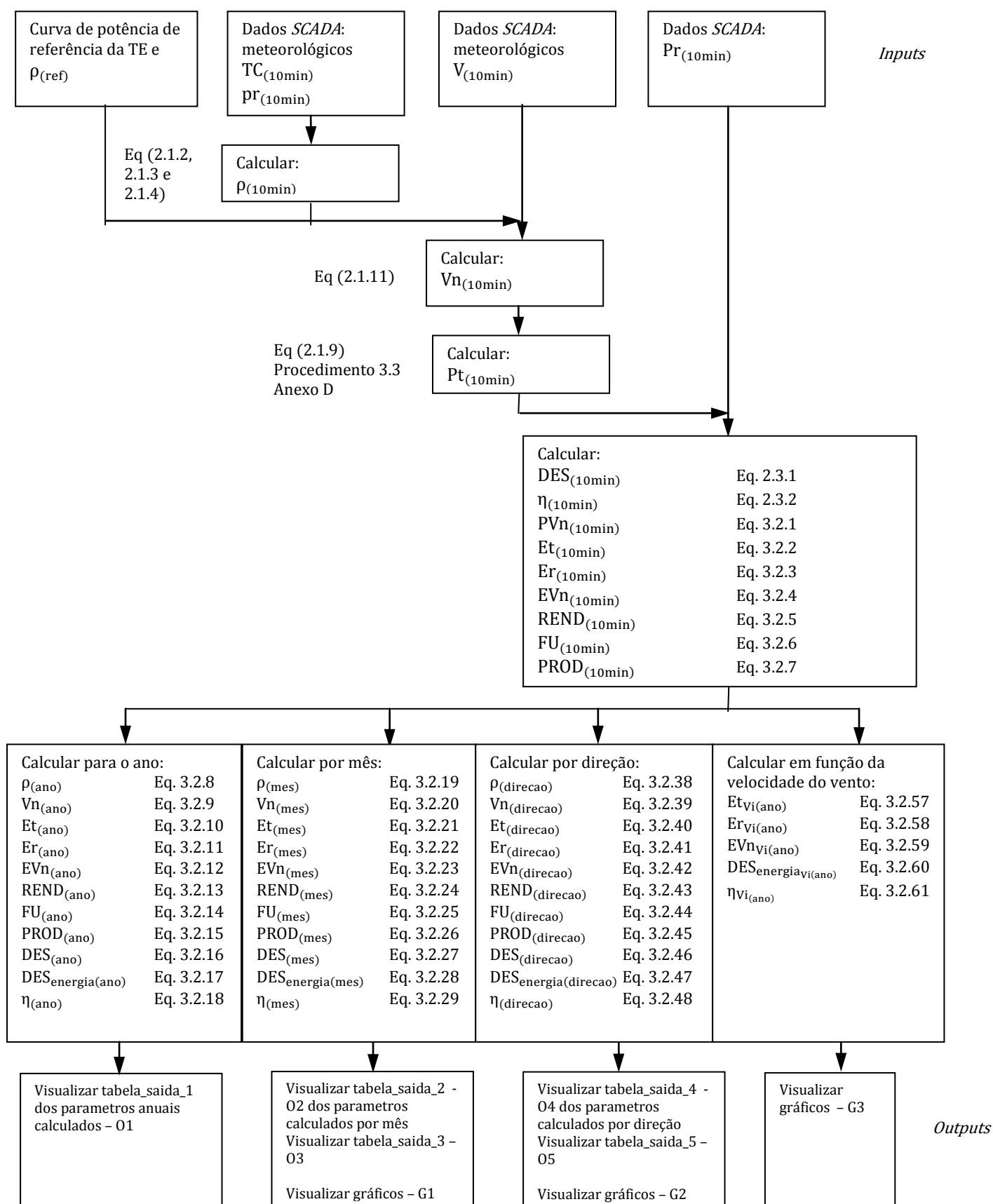


Figura 3.2 - Metodologia 2 para calcular alguns parâmetros de funcionamento da TE (por ano, por mês, por direção e em função da velocidade do vento) para um período de um ano (sem filtros)

As equações matemáticas utilizadas para os cálculos dos parâmetros a analisar são listadas nas seguintes tabelas:

Tabela 3.1 – Equações para o cálculo da MV média do ar ( $\rho$  – Kg/m<sup>3</sup>)

por períodos de 10 minutos	$\rho_{(10min)} = 100 \cdot \frac{pr_{(10min)}}{Ro \cdot TK_{(10min)}}$	(2.1.2)
	$Ro = 287,05 \text{ J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$	(2.1.3)
	$TK_{(10min)} = TC_{(10min)} + 273,15$	(2.1.4)
por ano (com 365 dias)	$\rho_{(ano)} = \frac{\sum_1^{52560} \rho_{(10min)}}{52560}$	(3.2.8)
por mês (com 31 dias)	$\rho_{(mes)} = \frac{\sum_1^{4464} \rho_{(10min)}}{4464}$	(3.2.19)
por direção	$\rho_{dir(ano)} = \frac{\sum_1^N \rho_{(10min)}}{N}$ <p>em que N é o número de períodos de 10 minutos para cada direção.</p>	(3.2.38)

Tabela 3.2 – Equações para o cálculo da velocidade média do vento normalizada ( $V_n$  – m/s)

por períodos de 10 minutos	$Vn_{(10min)} = V_{(10min)} \cdot \left( \frac{\rho_{(10min)}}{\rho_{(ref)}} \right)^{\frac{1}{3}}$	(2.1.11)
por ano (com 365 dias)	$Vn_{(ano)} = \frac{\sum_1^{52560} Vn_{(10min)}}{52560}$	(3.2.9)
por mês (com 31 dias)	$Vn_{(mes)} = \frac{\sum_1^{4464} Vn_{(10min)}}{4464}$	(3.2.20)
por direção	$Vn_{dir(ano)} = \frac{\sum_1^N Vn_{(10min)}}{N}$	(3.2.39)

Tabela 3.3 – Equações para o cálculo da energia teórica produzida pela TE (Et – MWh)

por períodos de 10 minutos	$Et_{(10min)} = \frac{Pt_{(10min)}}{6}$	(3.2.2)
por ano (com 365 dias)	$Et_{(ano)} = \frac{\sum_1^{52560} Et_{(10min)}}{1000}$	(3.2.10)
por mês (com 31 dias)	$Et_{(mes)} = \frac{\sum_1^{4464} Et_{(10min)}}{1000}$	(3.2.21)
por direção	$Et_{dir(ano)} = \frac{\sum_1^N Et_{(10min)}}{1000}$	(3.2.40)
em função da velocidade do vento	$Et_{Vi(ano)} = \frac{\sum_1^{Nv} Et_{(10min)}}{1000}$ <p>em que Nv é o número de períodos de 10 minutos para cada intervalo de velocidade do vento.</p>	(3.2.57)

Tabela 3.4 – Equações para o cálculo da energia real produzida pela TE (Er – MWh)

por períodos de 10 minutos	$Er_{(10min)} = \frac{Pr_{(10min)}}{6}$	(3.2.3)
por ano (com 365 dias)	$Er_{(ano)} = \frac{\sum_1^{52560} Er_{(10min)}}{1000}$	(3.2.11)
por mês (com 31 dias)	$Er_{(mes)} = \frac{\sum_1^{4464} Er_{(10min)}}{1000}$	(3.2.22)
por direção	$Er_{dir(ano)} = \frac{\sum_1^N Er_{(10min)}}{1000}$	(3.2.41)
em função da velocidade do vento	$Er_{Vi(ano)} = \frac{\sum_1^{Nv} Er_{(10min)}}{1000}$	(3.2.58)

Tabela 3.5 – Equações para o cálculo da energia disponível no vento (EVn – MWh)

por períodos de 10 minutos	$EVn_{(10min)} = \frac{PVn_{(10min)}}{6}$ $PVn_{(10min)} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{(10min)} \cdot A \cdot \frac{Vn_{(10min)}^3}{1000}$ <p>em que A é a área varrida pelo rotor da TE (m<sup>2</sup>).</p>	<p>(3.2.4)</p> <p>(3.2.1)</p>
por ano (com 365 dias)	$EVn_{(ano)} = \frac{\sum_1^{52560} EVn_{(10min)}}{1000}$	(3.2.12)
por mês (com 31 dias)	$EVn_{(mes)} = \frac{\sum_1^{4464} EVn_{(10min)}}{1000}$	(3.2.23)
por direção	$EVn_{dir(ano)} = \frac{\sum_1^N EVn_{(10min)}}{1000}$	(3.2.42)
em função da velocidade do vento	$EVn_{Vi(ano)} = \frac{\sum_1^{Nv} EVn_{(10min)}}{1000}$	(3.2.59)

Tabela 3.6 – Equações para o cálculo do desempenho médio da TE (DES – kW)

por períodos de 10 minutos	$DES_{(10min)} = Pr_{(10min)} - Pt_{(10min)}$	(2.3.1)
por ano (com 365 dias)	$DES_{(ano)} = \frac{\sum_1^{52560} DES_{(10min)}}{52560}$	(3.2.17)
por mês (com 31 dias)	$DES_{(mes)} = \frac{\sum_1^{4464} DES_{(10min)}}{4464}$	(3.2.28)
por direção	$DES_{dir(ano)} = \frac{\sum_1^N DES_{(10min)}}{N}$	(3.2.47)
em função da velocidade do vento	$DES_{Vi(ano)} = \frac{\sum_1^{Nv} DES_{(10min)}}{Nv}$	(3.2.66)

Tabela 3.7 – Equações para o cálculo do desempenho energético da TE (DES<sub>energia</sub> – MWh)

por períodos de 10 minutos	$DES_{energia(10min)} = Er_{(10min)} - Et_{(10min)}$	(3.2.65)
por ano (com 365 dias)	$DES_{energia(ano)} = Er_{(ano)} - Et_{(ano)}$	(3.2.16)
por mês (com 31 dias)	$DES_{energia(mes)} = Er_{(mes)} - Et_{(mes)}$	(3.2.27)
por direção	$DES_{energia_{dir}(ano)} = Er_{dir(ano)} - Et_{dir(ano)}$	(3.2.46)
em função da velocidade do vento	$DES_{energia_{vi}(ano)} = Er_{vi(ano)} - Et_{vi(ano)}$	(3.2.60)

Tabela 3.8 – Equações para o cálculo da eficiência média da TE ( $\eta$  – %)

por períodos de 10 minutos	$\eta_{(10min)} = \frac{Pr_{(10min)}}{Pt_{(10min)}} \times 100 (\%)$	(2.3.2)
por ano (com 365 dias)	$\eta_{(ano)} = \frac{Er_{(ano)}}{Et_{(ano)}} \times 100$	(3.2.18)
por mês (com 31 dias)	$\eta_{(mes)} = \frac{Er_{(mes)}}{Et_{(mes)}} \times 100$	(3.2.29)
por direção	$\eta_{dir(ano)} = \frac{Er_{dir(ano)}}{Et_{dir(ano)}} \times 100$	(3.2.48)
em função da velocidade do vento	$\eta_{vi(ano)} = \frac{Er_{vi(ano)}}{Et_{vi(ano)}} \times 100$	(3.2.61)

Os parâmetros calculados nas três tabelas anteriores dão informação diferente dos parâmetros calculados nas três tabelas seguintes. Enquanto a eficiência e o desempenho dão uma informação do estado de funcionamento ou “do estado de saúde” da TE (como explicado nos subcapítulo 2.3.1. e 2.3.2), o rendimento, o fator de utilização e a produtividade dão uma

indicação da utilização ou do aproveitamento dos recursos eólicos (energia do vento) e dos recursos técnicos da TE (potência nominal e área varrida pelo rotor).

O rendimento representa a percentagem da energia do vento que é convertida em energia elétrica e injetada na rede.

O fator de utilização indica a percentagem da potência nominal utilizada em média num período de tempo.

A produtividade simboliza a energia produzida por m<sup>2</sup> de área varrida pelo rotor num período de tempo.

Portanto estes três parâmetros não sinalizam diretamente se a TE está a funcionar normalmente, sem perdas reais de produção elétrica em relação à produção teórica prometida/garantida pelo fabricante.

Tabela 3.9 – Equações para o cálculo do rendimento da TE (REND – %)

por períodos de 10 minutos	$\text{REND}_{(10\text{min})} = \frac{\text{Er}_{(10\text{min})}}{\text{EVn}_{(10\text{min})}} \times 100$	(3.2.5)
por ano (com 365 dias)	$\text{REND}_{(\text{ano})} = \frac{\text{Er}_{(\text{ano})}}{\text{EVn}_{(\text{ano})}} \times 100$	(3.2.13)
por mês (com 31 dias)	$\text{REND}_{(\text{mes})} = \frac{\text{Er}_{(\text{mes})}}{\text{EVn}_{(\text{mes})}} \times 100$	(3.2.24)
por direção	$\text{REND}_{\text{dir}(\text{ano})} = \frac{\text{Er}_{\text{dir}(\text{ano})}}{\text{EVn}_{\text{dir}(\text{ano})}} \times 100$	(3.2.43)

Tabela 3.10 – Equações para o cálculo do fator de utilização da TE (FU – %)

por períodos de 10 minutos	$\text{FU}_{(10\text{min})} = \frac{\text{Pr}_{(10\text{min})}}{\text{P}_{\text{nominal}}} \times 100$	(3.2.6)
por ano (com 365 dias)	$\text{FU}_{(\text{ano})} = \frac{\text{Er}_{(\text{ano})} \times 1000}{\text{P}_{\text{nominal}} \times 8760} \times 100$	(3.2.14)
por mês (com 31 dias)	$\text{FU}_{(\text{mes})} = \frac{\text{Er}_{(\text{mes})} \times 1000}{\text{P}_{\text{nominal}} \times \text{horas}_{(\text{mes})}} \times 100$	(3.2.25)
por direção	$\text{FU}_{\text{dir}(\text{ano})} = \frac{\text{Er}_{\text{dir}(\text{ano})} \times 1000}{\text{P}_{\text{nominal}} \times \text{horas}_{(\text{direcao})}} \times 100$	(3.2.44)



Tabela 3.11 – Equações para o cálculo da produtividade da TE (PROD – kWh/m<sup>2</sup>)

por períodos de 10 minutos	$PROD_{(10min)} = \frac{Pr_{(10min)}}{A}$ em que A é a área varrida pelo rotor da TE.	(3.2.7)
por ano (com 365 dias)	$PROD_{(ano)} = \frac{Er_{(ano)}}{A}$	(3.2.15)
por mês (com 31 dias)	$PROD_{(mes)} = \frac{Er_{(mes)}}{A}$	(3.2.26)
por direção	$PROD_{dir(ano)} = \frac{Er_{dir(ano)}}{A}$	(3.2.45)

Para confirmar os parâmetros mensais, direcionais e em função da velocidade do vento com os parâmetros anuais foram aplicadas as equações matemáticas e verificadas as igualdades apresentadas nas seguintes tabelas:

Tabela 3.12 – Equações para confirmar os parâmetros mensais com os parâmetros anuais

A energia teórica produzida pela TE para um período de um ano (MWh)	$Et_{(ano)} = \sum_1^{12} Et_{(mes)}$	(3.2.30)	3.2.30=3.2.10
A energia real produzida pela TE para um período de um ano (MWh)	$Er_{(ano)} = \sum_1^{12} Er_{(mes)}$	(3.2.31)	3.2.31=3.2.11
A energia disponível no vento para um período de um ano (MWh)	$EVn_{(ano)} = \sum_1^{12} EVn_{(mes)}$	(3.2.32)	3.2.32=3.2.12
O rendimento da TE para um período de um ano (%)	$REnd_{(ano)} = \frac{Er_{(ano)}}{EVn_{(ano)}} \times 100$	(3.2.33)	3.2.33=3.2.13
O fator de utilização da TE para um período de um ano (%)	$FU_{(ano)} = \frac{Er_{(ano)} \times 1000}{P_{nominal} \times 8760} \times 100$	(3.2.34)	3.2.34=3.2.14
A produtividade da TE para um período de um ano (MWh.ano/m <sup>2</sup> )	$PROD_{(ano)} = \frac{Er_{(ano)}}{A}$	(3.2.35)	3.2.35=3.2.15
O desempenho energético da TE para um período de um ano (MWh/ano)	$DES_{energia(ano)} = \sum_1^{12} DES_{energia(mes)}$	(3.2.36)	3.2.36=3.2.16
A eficiência média da TE para um período de um ano (%)	$\eta_{(ano)} = \frac{Er_{(ano)}}{Et_{(ano)}} \times 100$	(3.2.37)	3.2.37=3.2.18

Tabela 3.13 – Equações para confirmar os parâmetros direcionais com os parâmetros anuais

A energia teórica produzida pela TE para um período de um ano (MWh)	$Et_{(ano)} = \sum_1^{12} Et_{dir(ano)}$ <p>em que 12 é o número de direções da velocidade do vento consideradas.</p>	(3.2.49)	3.2.49=3.2.10
A energia real produzida pela TE para um período de um ano (MWh)	$Er_{(ano)} = \sum_1^{12} Er_{dir(ano)}$	(3.2.50)	3.2.50=3.2.11
A energia disponível no vento para um período de um ano (MWh)	$EVn_{(ano)} = \sum_1^{12} EVn_{dir(ano)}$	(3.2.51)	3.2.51=3.2.12
O rendimento da TE para um período de um ano (%)	$REND_{(ano)} = \frac{Er_{(ano)}}{EVn_{(ano)}} \times 100$	(3.2.52)	3.2.52=3.2.13
O fator de utilização da TE para um período de um ano (%)	$FU_{(ano)} = \frac{Er_{(ano)} \times 1000}{P_{nominal} \times 8760} \times 100$	(3.2.53)	3.2.53=3.2.14
A produtividade da TE para um período de um ano (MWh.ano/m <sup>2</sup> )	$PROD_{(ano)} = \frac{Er_{(ano)}}{A}$	(3.2.54)	3.2.54=3.2.15
O desempenho energético da TE para um período de um ano (MWh/ano)	$DES_{energia(ano)} = \sum_1^{12} DES_{energia_{dir(ano)}}$	(3.2.55)	3.2.55=3.2.16
A eficiência média da TE para um período de um ano (%)	$\eta_{(ano)} = \frac{Er_{(ano)}}{Et_{(ano)}} \times 100$	(3.2.56)	3.2.56=3.2.18

Tabela 3.14 – Equações para confirmar os parâmetros em função da velocidade do vento com os parâmetros anuais

A energia teórica produzida pela TE para um período de um ano (MWh)	$Et_{(ano)} = \sum_1^{29} Et_{Vi(ano)}$ <p>em que 29 é o número de intervalos de velocidade do vento considerados.</p>	(3.2.62)	3.2.62=3.2.10
A energia real produzida pela TE para um período de um ano (MWh)	$Er_{(ano)} = \sum_1^{29} Er_{Vi(ano)}$	(3.2.63)	3.2.63=3.2.11
A energia disponível no vento para um período de um ano (MWh)	$EVn_{(ano)} = \sum_1^{29} EVn_{Vi(ano)}$	(3.2.64)	3.2.64=3.2.12

### 3.3. Metodologia 3 – calcular o $DES_{(semana)}$ e o $\sigma_{DES_{(semana)}}$ da TE das últimas 52 semanas e prever as próximas 5 semanas (sem filtros)

A figura 3.3 mostra o esquema das principais etapas da metodologia 3. Os *inputs* são os dados da potência real da TE obtidos do *SCADA* ( $Pr_{(10min)}$ ) e os dados da potência teórica da TE calculados anteriormente ( $Pt_{(10min)}$ ). Os *outputs* são os gráficos da variação da média e do desvio padrão do desempenho da potência da TE das últimas 52 semanas e previsão para as próximas 5 semanas.

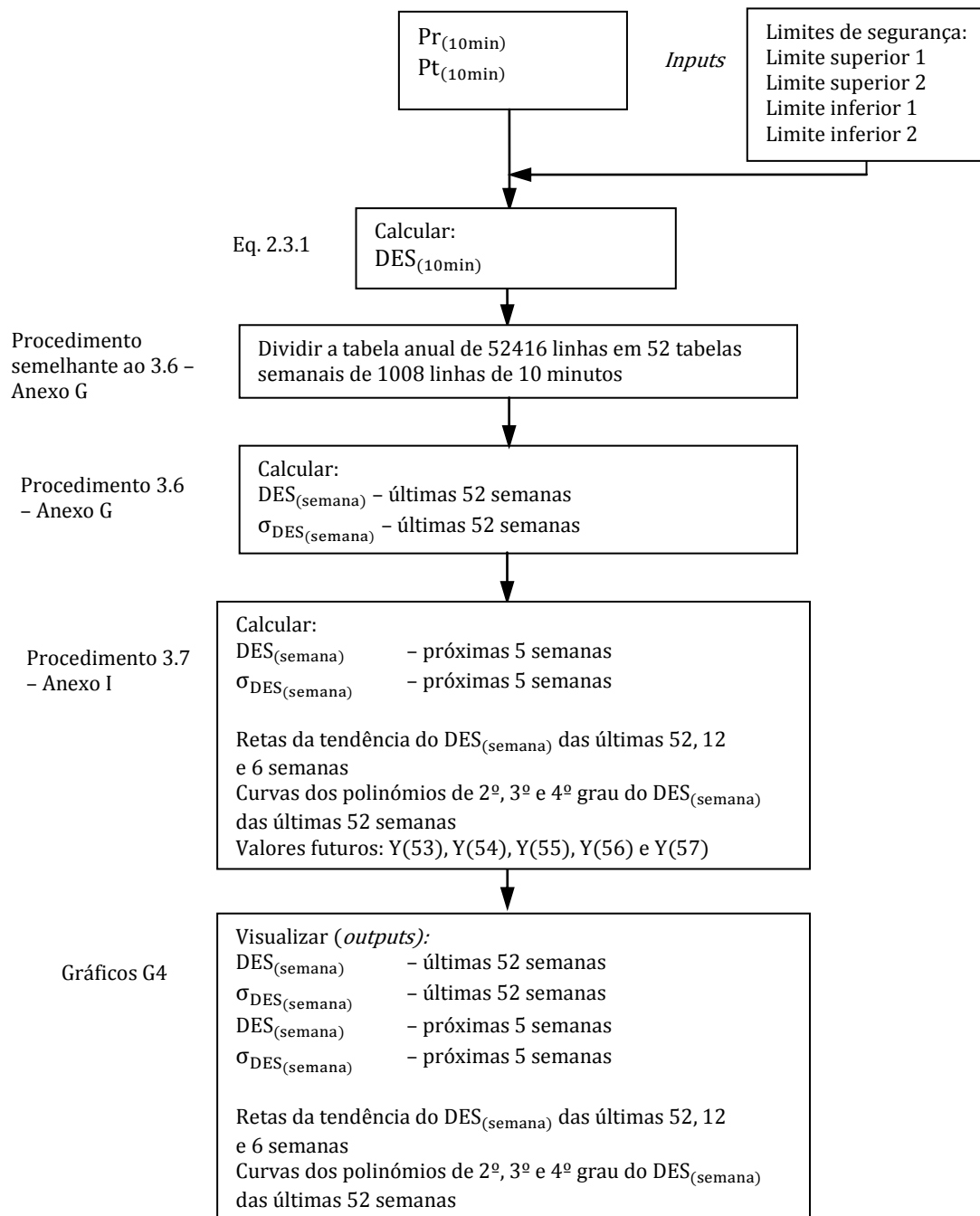


Figura 3.3 – Metodologia 3 para analisar o  $DES_{(semana)}$  e o  $\sigma_{DES_{(semana)}}$  da TE das últimas 52 semanas e prever as próximas 5 semanas (sem filtros)

O primeiro passo é ler os *inputs*, a  $Pr_{(10min)}$  e a  $Pt_{(10min)}$  e calcular  $DES_{(10min)}$  através da equação 2.3.1.

A etapa que se segue é calcular as médias e os desvios padrão semanais do desempenho da TE ao longo das últimas 52 semanas - análise semanal. Para isso a matriz com os dados dum ano é dividida em 52 matrizes semanais e para cada uma dessas matrizes semanais são calculadas as médias e os desvios padrão semanais através dos comandos MATLAB do procedimento 3.6 – anexo G.

A passo seguinte é prever a variação da média e do desvio padrão do desempenho ao longo das próximas 5 semanas. Para isso são usados os comandos MATLAB do procedimento 3.8 – anexo I. O método utilizado é o dos quadrados mínimos, que consiste em aproximar os dados por uma função que minimiza o erro quadrático em cada um dos pontos. O Matlab fornece a função *polyfit* para o ajuste de curvas através deste método. A função apresenta a sintaxe  $p = \text{polyfit}(xx\_s, \text{DESEMPENHO\_semanal}, n)$ , em que *xx\_s* representa as 52 semanas (1, 2, 3, 4, 5,..., 51, 52), o *DESEMPENHO\_semanal* representa as últimas 52 médias semanais do desempenho ou os últimos 52 desvios padrão do desempenho da TE e *n* a ordem ou grau do polinómio para ajuste dos dados. O vetor *p* é um vetor linha de comprimento *n*+1, com os coeficientes do polinómio que melhor ajusta os dados.

$p1 = \text{polyfit}(xx\_s, \text{DESEMPENHO\_semana}, 1)$	Polinómio de grau 1	(3.3.1)
$p2 = \text{polyfit}(xx\_s, \text{DESEMPENHO\_semana}, 2)$	Polinómio de grau 2	(3.3.2)
$p3 = \text{polyfit}(xx\_s, \text{DESEMPENHO\_semana}, 3)$	Polinómio de grau 3	(3.3.3)
$p4 = \text{polyfit}(xx\_s, \text{DESEMPENHO\_semana}, 4)$	Polinómio de grau 4	(3.3.4)
$p5 = \text{polyfit}(xx\_s, \text{DESEMPENHO\_semana}, 5)$	Polinómio de grau 5	(3.3.5)

Para calcular os valores “futuros” das médias semanais do desempenho da TE, *Y* (53), *Y* (54), *Y* (55), *Y* (56), *Y* (57) para cada uma das funções polinomiais (*p1*, *p2*, *p3*, *p4*, *p5*) o Matlab fornece a função *polyval*, que faz a extrapolação polinomial dos dados do passado para o futuro. A função apresenta a sintaxe  $\text{DESEMPENHO\_semana\_x\_pn} = \text{polyval}(pn, x)$ , em que *x* representa o número da semana do futuro a calcular a média (53, 54, 55, 56 e 57) e *pn* a ordem ou grau do polinómio para ajuste dos dados (*p1*, *p2*, *p3*, *p4* e *p5*).

$Y(53)\_p1 = \text{DESEMPENHO\_semana\_53\_p1} = \text{polyval}(p1, 53)$	(3.3.6)
$Y(54)\_p1 = \text{DESEMPENHO\_semana\_54\_p1} = \text{polyval}(p1, 54)$	(3.3.7)
$Y(55)\_p1 = \text{DESEMPENHO\_semana\_55\_p1} = \text{polyval}(p1, 55)$	(3.3.8)
$Y(56)\_p1 = \text{DESEMPENHO\_semana\_56\_p1} = \text{polyval}(p1, 56)$	(3.3.9)
$Y(57)\_p1 = \text{DESEMPENHO\_semana\_57\_p1} = \text{polyval}(p1, 57)$	(3.3.10)

As médias semanais do desempenho, para as próximas 5 semanas, são também calculadas para os polinómios de grau 2, 3, 4 e 5.

A variação da média e do desvio padrão do desempenho ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas podem ser visualizados nos gráficos G4.

### 3.4. Metodologia 4 – calcular o $DES_{(dia)}$ e o $\sigma_{DES_{(dia)}}$ da TE dos últimos 31 dias e prever os próximos 7 dias (sem filtros)

O procedimento de cálculo é em tudo semelhante ao modelo anual/semanal, analisado no subcapítulo anterior, só que em vez de trabalhar numa base temporal em semanas, trabalha numa base temporal em dias. É um modelo de certa forma complementar do anterior, com a diferença de aumentar a sensibilidade da análise e da previsão, isto é prevê as variações do desempenho da TE num intervalo de tempo sete vezes mais curto.

O modelo de previsão do desempenho da TE para os próximos 7 dias, com dados dos últimos 31 dias, usa como algoritmo a extrapolação polinomial das 31 médias diárias, baseada na hipótese de que a tendência (“função polinomial”) obtida com as observações da série se mantém no futuro próximo, isto é considera-se a ausência de qualquer choque, rotura ou avaria no equipamento turbina.

A figura 3.4 mostra o esquema das principais fases desta metodologia que não usa filtros. Os *inputs* são os dados da potência real da TE obtidos do SCADA ( $Pr_{(10min)}$ ) e os dados da potência teórica da TE calculada anteriormente ( $Pt_{(10min)}$ ). Os *outputs* são os gráficos da variação da média e do desvio padrão do desempenho diário da TE, dos últimos 31 dias e previsão para os próximos 7 dias.

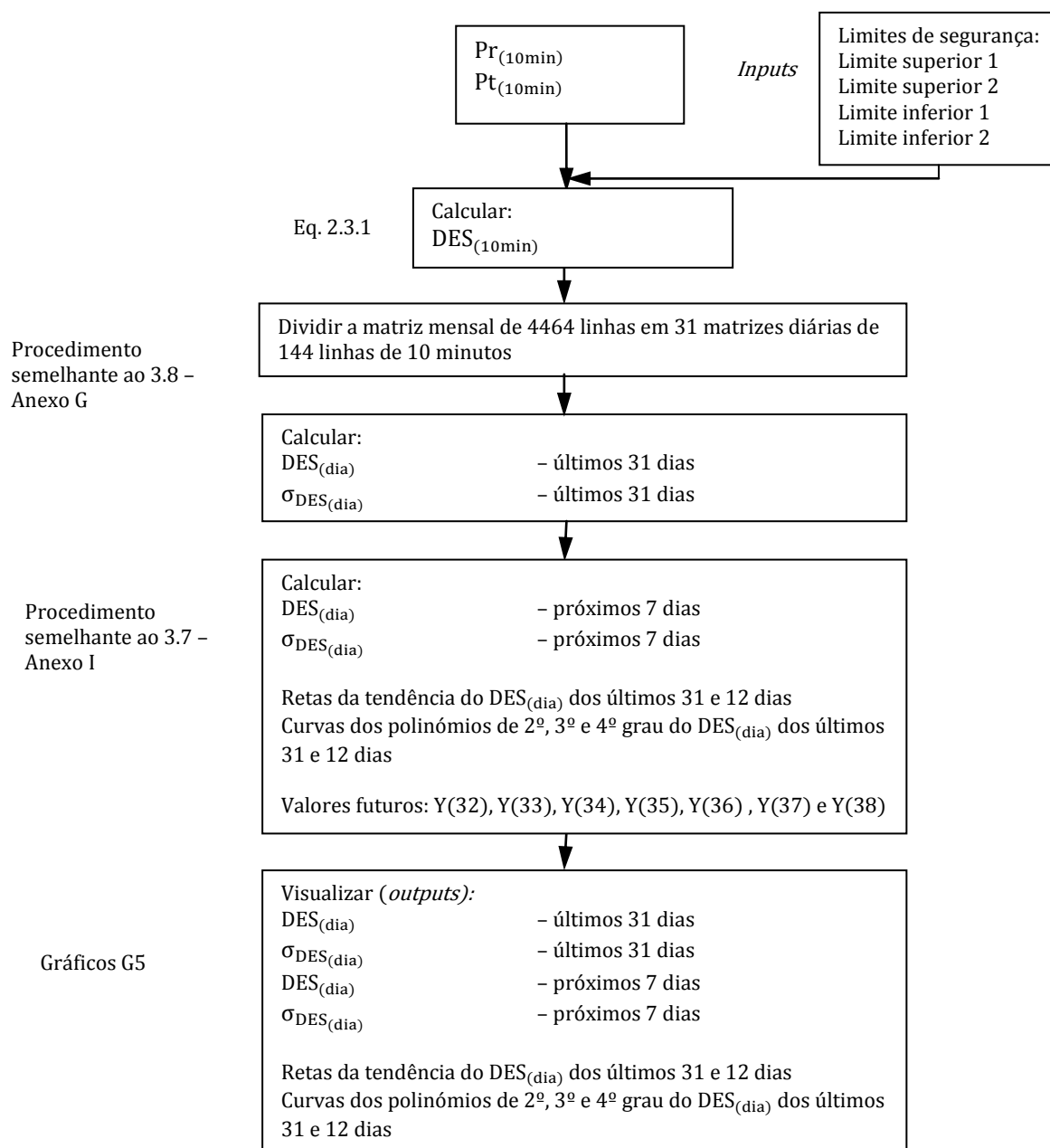


Figura 3.4 – Metodologia 4 para analisar o  $DES_{(dia)}$  e o  $\sigma_{DES(dia)}$  da TE dos últimos 31 dias e prever os próximos 7 dias (sem filtros)

O primeiro passo é ler os *inputs*, a  $Pr_{(10min)}$  e a  $Pt_{(10min)}$  e calcular  $DES_{(10min)}$  através da equação 2.3.1.

A etapa que se segue é calcular as variáveis a analisar para o período de um dia – análise diária. Para isso a matriz com os dados dum mês é dividida em 31 matrizes diárias e para cada uma dessas matrizes diárias são calculadas as médias e os desvios padrão diários através dos comandos MATLAB (procedimento 3.8 – anexo H).

Para prever os valores futuros usa-se um procedimento idêntico ao procedimento 3.7 – anexo I.

A variação da média e do desvio padrão do desempenho da TE ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias podem ser visualizados nos gráficos G5.

### **3.5. Metodologia 5 - calcular a $\eta_{Vi_{(semana)}}$ da TE das últimas 52 semanas e prever as próximas 5 semanas, para quatro intervalos da velocidade do vento (com filtros)**

Uma das diferenças desta metodologia em relação às duas anteriores é a aplicação de dois filtros como se pode observar na figura 3.5. O primeiro filtro elimina os dados incorretos ou anormais das temperaturas e das pressões, isto é, todos os valores da temperatura do ar (fornecidos pelo *SCADA*) inferiores a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou superiores a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  e todos os valores da pressão do ar inferiores a 600 mbar ou superiores a 1200 mbar, são considerados incorretos e por isso filtrados, não entrando em conta para as análises posteriores (anexo B – procedimento 3.1).

O segundo filtro elimina os valores anormais da potência real (*SCADA*) em relação à potência teórica calculada pela curva da potência de referência do fabricante e da velocidade do vento normalizada, isto é, considera-se que quando a potência real é superior à potência teórica em  $20\% +50\text{ kW}$  ou inferior à potência teórica em  $-20\% -50\text{ kW}$ , que existiu uma causa especial a afetar o processo de produção de eletricidade da TE, ou seja, por alguma razão especial a TE não funcionou normalmente durante esses 10 minutos (ou total ou parcialmente), esteve parada por alguns períodos, logo esses valores da potência real não vão entrar em conta para o cálculo da eficiência da TE ao longo do tempo (procedimento 3.9 - anexo J).

As causas especiais ou acidentais que podem afetar a produção de eletricidade na TE podem ser falhas na rede, sensores de controlo que detetaram algo de anormal que levou à paragem temporária da TE por segurança, sendo necessário reiniciar o processo de produção, falha nalgum equipamento de medida, avaria nalguma peça ou erro do operador da TE. Como o objetivo é analisar a variação da eficiência da TE ao longo do tempo, estas causas especiais, que provocam a variação do processo produtivo têm de ser eliminadas para que se possa analisar somente as causas normais de variação do processo produtivo da própria TE.

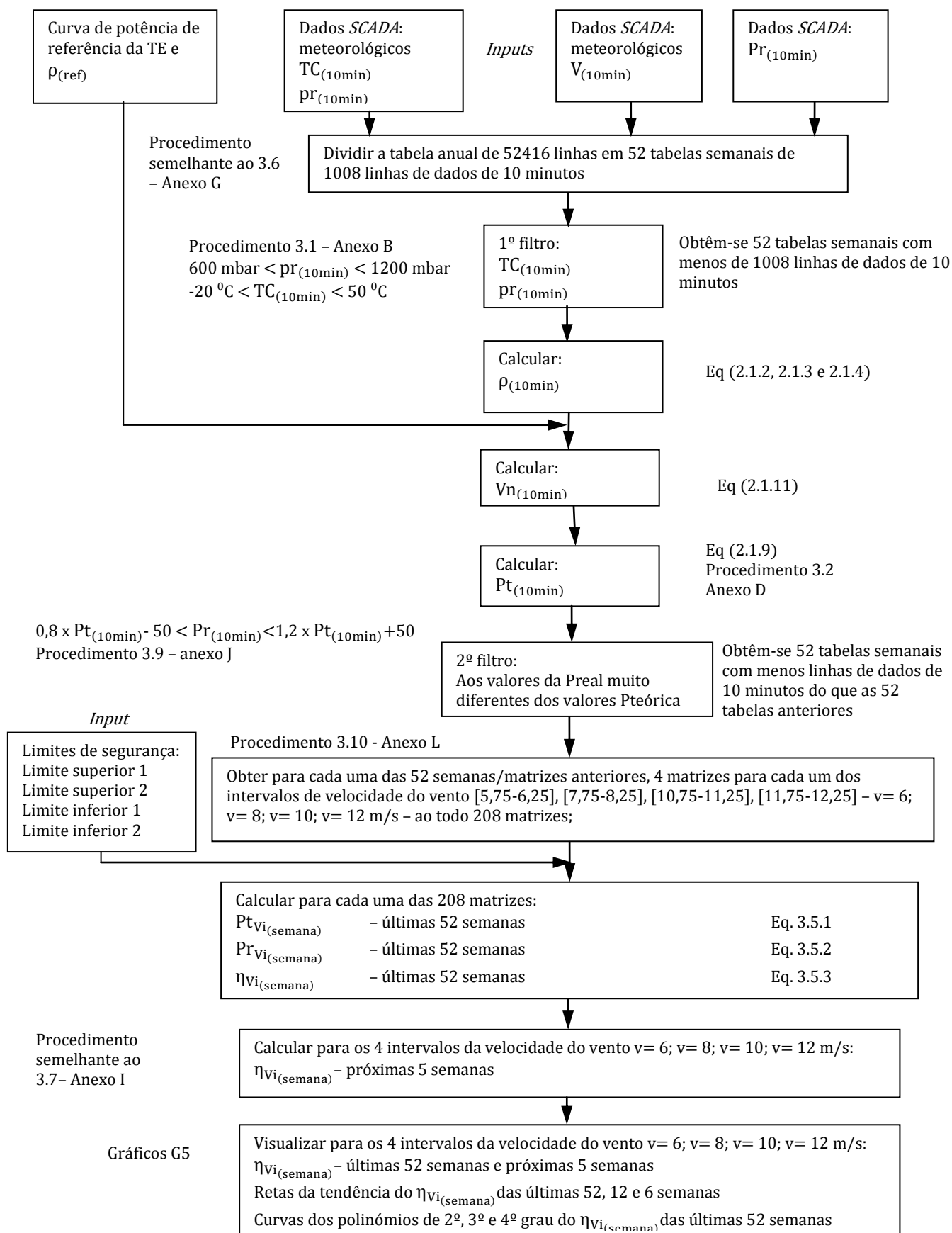


Figura 3.5 – Metodologia 5 para analisar a  $\eta_{Vi(semana)}$  da TE nas últimas 52 semanas e prever as próximas 5 semanas (com filtros), para os intervalos da velocidade do vento  $v=6$ ;  $v=8$ ;  $v=10$ ;  $v=12 \text{ m/s}$

Na fase da metodologia em que se tem 208 matrizes (52\_semanas x 4\_intervalos de velocidade) aplicam-se as seguintes equações a cada uma dessas matrizes:

A potência teórica média produzida pela TE (MWh) é:

$$Pt_{Vi(\\text{semana})} = \frac{\sum_1^N Pt_{Vi(10min)}}{N} \quad (3.5.1)$$

em que N é o número de períodos de 10 minutos de cada uma das 208 matrizes.

A potência real média produzida pela TE (MWh) é:

$$Pr_{Vi(\\text{semana})} = \frac{\sum_1^N Pr_{Vi(10min)}}{N} \quad (3.5.2)$$

A eficiência média da TE (%) é:

$$\eta_{Vi(\\text{semana})} = \frac{Pr_{Vi(\\text{semana})}}{Pt_{Vi(\\text{semana})}} \times 100 \quad (3.5.3)$$

Para calcular a média da eficiência das próximas 5 semanas usa-se um procedimento semelhante ao procedimento 3.7 – anexo I.

### **3.6. Metodologia 6 – calcular a $\eta_{Vi(dia)}$ da TE nos últimos 31 dias e prever os próximos 7 dias, para quatro intervalos da velocidade do vento (com filtros)**

O procedimento de cálculo é semelhante ao descrito no subcapítulo anterior, como se pode observar na figura 3.6, só que em vez de trabalhar numa base temporal em semanas, trabalha numa base temporal em dias.

Na fase da metodologia em que se tem 124 matrizes (31\_dias x 4\_intervalos de velocidade) aplicam-se as seguintes equações a cada uma dessas matrizes:

A potência teórica média produzida pela TE (MWh) é:

$$Pt_{Vi(dia)} = \frac{\sum_1^N Pt_{Vi(10min)}}{N} \quad (3.6.1)$$

em que N é o número de períodos de 10 minutos de cada uma das 124 matrizes.

A potência real média produzida pela TE (MWh) é:

$$Pr_{Vi(dia)} = \frac{\sum_1^N Pr_{Vi(10min)}}{N} \quad (3.6.2)$$

A eficiência média da TE (%) é:

$$\eta_{Vi(dia)} = \frac{Pr_{Vi(dia)}}{Pt_{Vi(dia)}} \times 100 \quad (3.6.3)$$

Para calcular a média da eficiência nos próximos sete dias usa-se um procedimento semelhante ao procedimento 3.7 – anexo I.



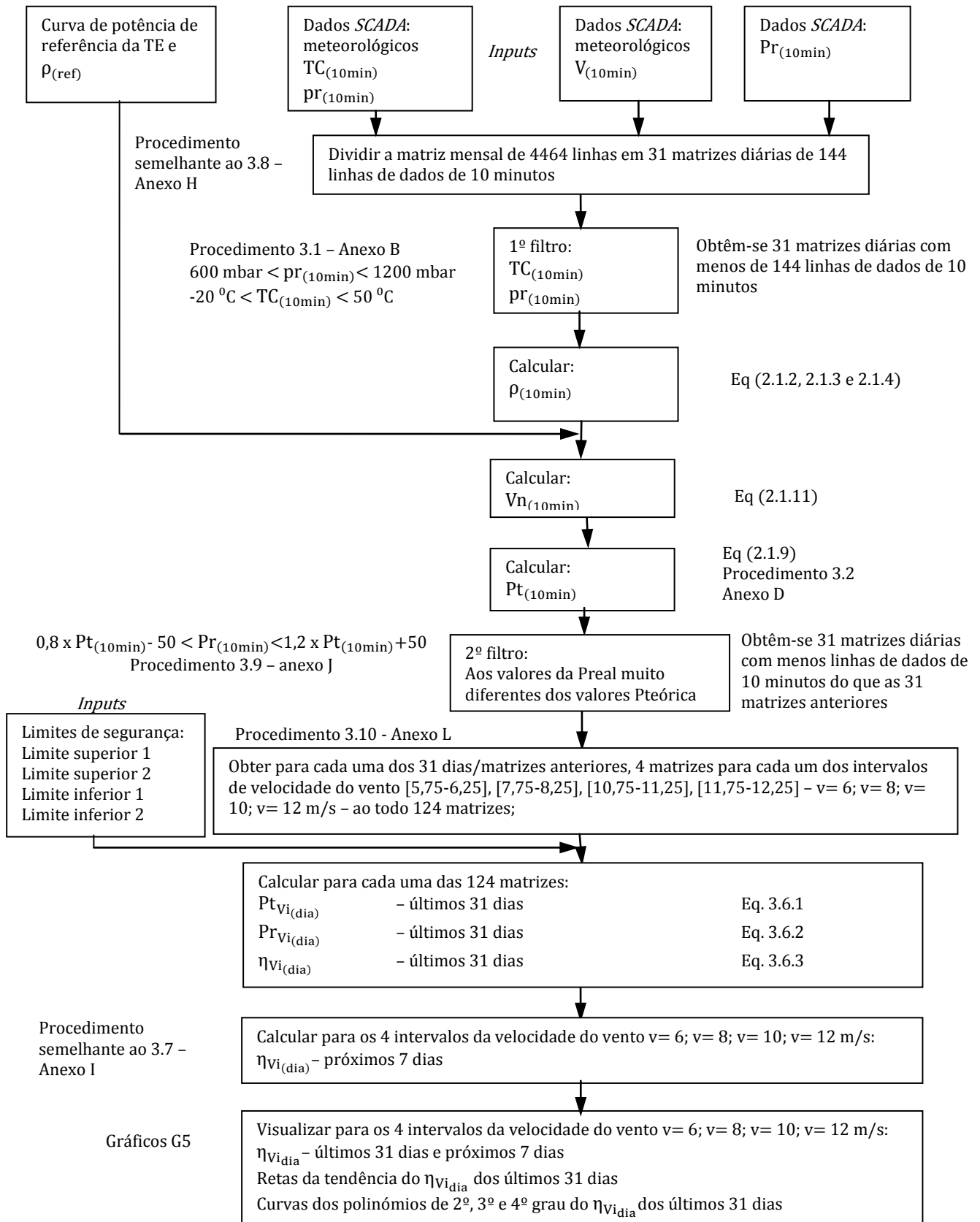


Figura 3.6 – Metodologia 6 para analisar a  $\eta_{Vi(dia)}$  da TE nos últimos 31 dias e prever os próximos 7 dias (com filtros), para os intervalos da velocidade do vento  $v=6$ ;  $v=8$ ;  $v=10$ ;  $v=12$  m/s



## Capítulo 4 – Descrição dos programas criados em MATLAB

O presente capítulo aborda a *interface* gráfica com o utilizador, dos quatro programas criados em MATLAB, de forma a disponibilizar uma interatividade simples.

O programa Calcular\_M\_Vol\_Ref\_Curva\_Pot\_Ref aplica a metodologia 1, o programa AnalíTE2 aplica a metodologia 2, 3 e 4, o programa AnalíTE\_CEP\_52semanas aplica a metodologia 5 e o programa AnalíTE\_CEP\_31dias aplica a metodologia 6.

Os programas foram elaborados recorrendo à plataforma de programação disponibilizada pelo Matlab, devido ao facto do Matlab ser um *software* bastante popular em computação técnica e científica, usado por engenheiros, estudantes e cientistas em todo o mundo. O seu sistema de computação é, atualmente, um dos mais poderosos no que diz respeito à sua forma de lidar com cálculos envolvidos em problemas de engenharia aliado à sua facilidade de utilização e aprendizagem. Posto isto, desenvolveu-se uma *interface* gráfica capaz de proporcionar ao utilizador uma interação simples e clara recorrendo ao *Grafic User Interface (GUI)* disponibilizado por esta aplicação no sentido de ir ao encontro do objetivo estipulado oferecendo ao utilizador algum controlo das características da aplicação desenvolvida bem como a possibilidade de visualização de dados e resultados.

### 4.1. Programa Calcular\_M\_Vol\_Ref\_Curva\_Pot\_Ref

O programa Calcular\_M\_Vol\_Ref\_Curva\_Pot\_Ref aplica a metodologia 1 adotada para calcular a massa volúmica de referência e a curva de potência de referência de uma TE. A figura 4.1 ilustra o ambiente de trabalho inicial e a figura 4.2 ilustra o ambiente de trabalho final do programa.

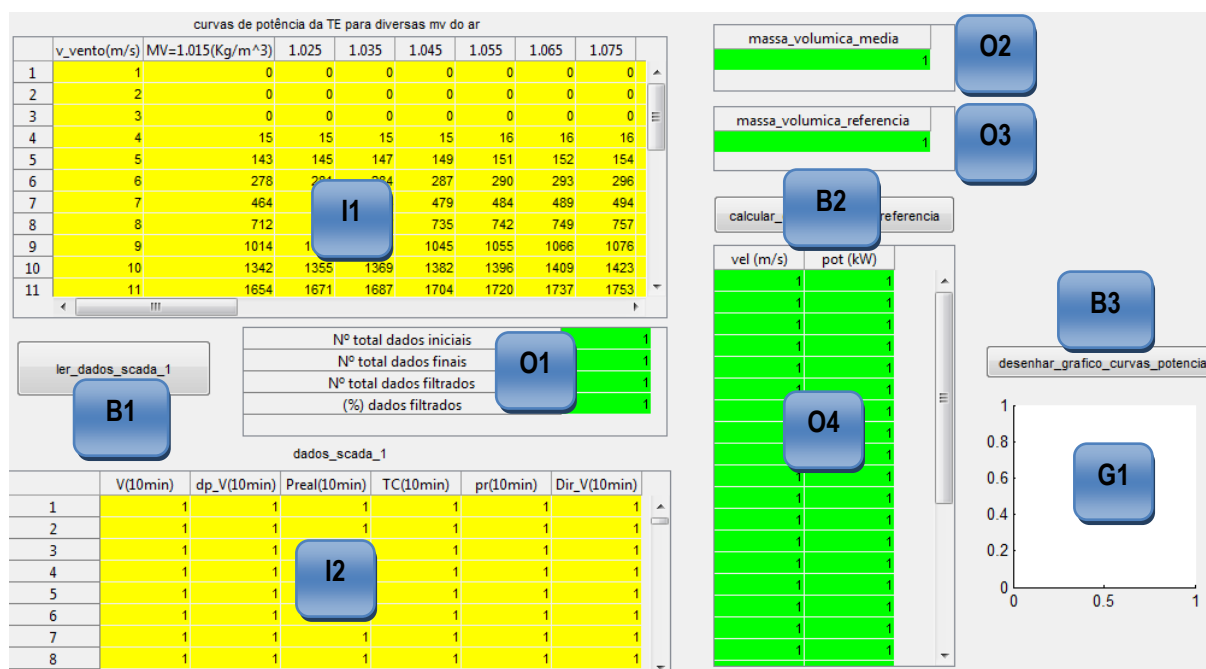


Figura 4.1 - Figura principal inicial do programa Calcular\_M\_Vol\_Ref\_Curva\_Pot\_Ref

Os *inputs* são as curvas de potência da TE para diversas MV do ar da tabela I1, neste caso da TE Nordex N90 do anexo A e os dados meteorológicos do *SCADA* da tabela I2.

Ao acionar o botão B1 - ler\_dados\_scada\_1 são executadas as ações de ler e preencher com os dados atmosféricos do SCADA a tabela I2 dados\_scada\_1, é preenchida a tabela O1 relativa ao número de dados filtrados e a tabela O2 da massa\_volumica\_média.

Ao acionar o botão B2 – é calculada a MV de referência, a curva de potência de referência e preenchidas as tabelas O3 da massa\_volumica\_referencia e O4 da curva de potência de referência.

Ao acionar o botão B3 – é executado o gráfico G1 das curvas de potência da TE figura 2.3.

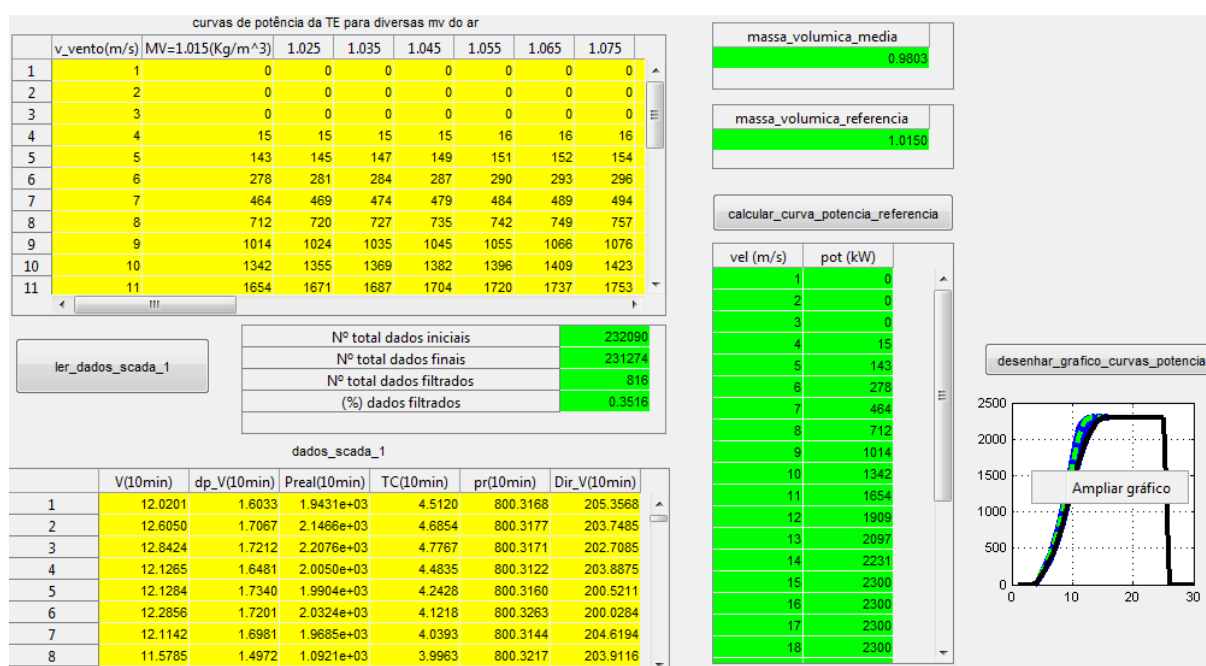


Figura 4.2 - Figura principal final do programa Calc\_M\_Vol\_Ref\_Curva\_Pot\_Ref

## 4.2. Programa AnaliTE2 (sem filtros)

O intuito do AnaliTE2 numa primeira fase é auxiliar os responsáveis pela produção e manutenção das TE's na gestão do ativo TE e na maximização dos respetivos lucros de exploração da produção de eletricidade renovável. Numa segunda fase já com o AnaliTE2 "calibrado" e testado em diversas TE e condições ambientais, com muitas análises de dados históricos do desempenho em situações de avarias ou avarias iminentes e com o aumento de experiência dos utilizadores, o AnaliTE2 vai permitir prever com antecedência de algumas semanas ou em alguns dias as avarias, tornando possível planear as intervenções com antecedência.

O programa AnaliTE2 aplica a metodologia 2, 3 e 4. A figura 4.3 mostra o ambiente de trabalho inicial e a figura 4.26 o ambiente final de trabalho do programa AnaliTE2. O ambiente de trabalho está dividido em quatro zonas. A zona 1 dos *inputs* possibilita carregar os dados da TE, a curva de potência de referência da TE, a MV de referência e os dados do SCADA. As zonas 2, 3 e 4 dizem respeito aos *outputs* das metodologias 2, 3 e 4.

Na zona 1 o botão B1- pasta\_turbinas é para ler o ficheiro das características da TE e da curva de potência de referência da TE, neste caso da TE Nordex\_2300\_90\_80\_1\_015 ( $\rho_{ref} = 1,015 \text{ kg/m}^3$ ) - Anexo M e preencher a tabela I1.

O botão B2 – ler\_dados\_scada\_1 é para ler e preencher com todos os dados do SCADA a tabela I2.

O botão B3 – ler\_dados\_scada\_ano é para selecionar o ano a analisar e preencher a tabela I3.

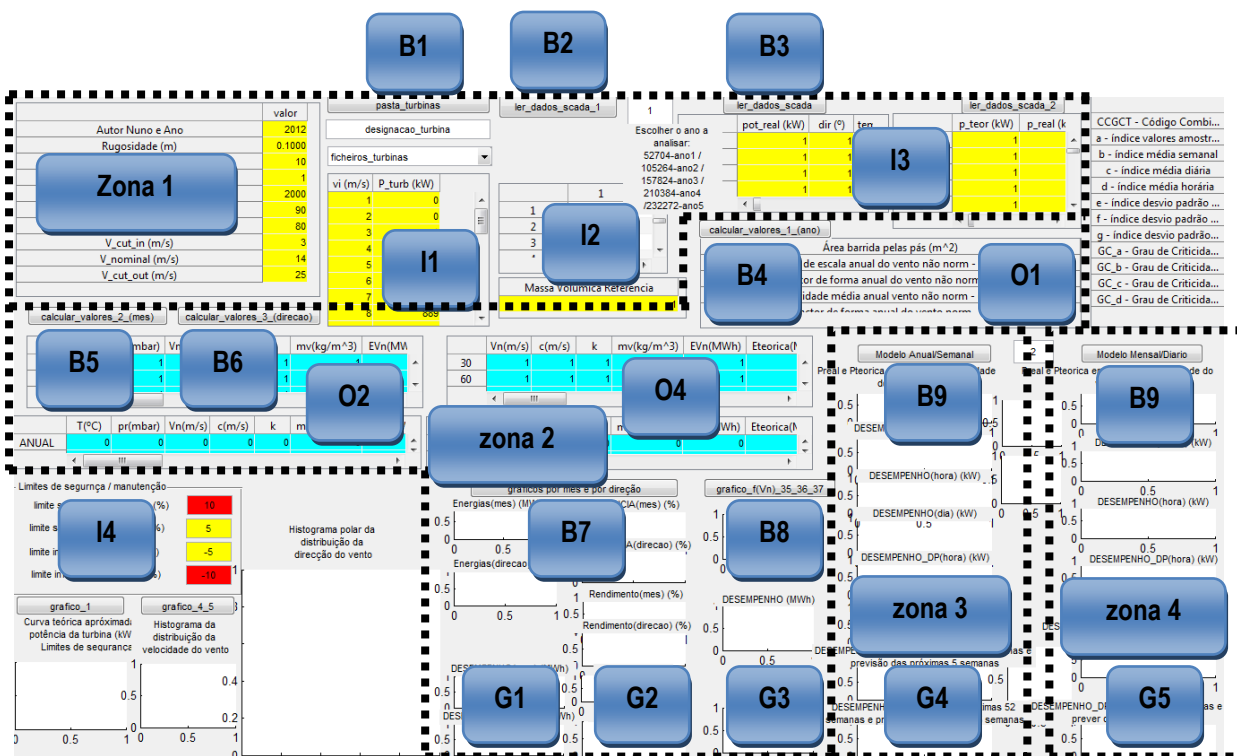


Figura 4.3 - Figura principal inicial do programa AnalITE2

Na zona 2 é aplicada a metodologia 2. O botão B4 - calcular\_valores\_1\_(ano) é para calcular os parâmetros por ano – análise anual. É preenchida a tabela O1- figura 4.4.

O botão B5 - calcular\_valores\_2\_(mes) é para calcular os parâmetros por mês – análise mensal. São preenchidas as tabelas O2 e O3 - figura 4.5 e figura 4.6.

O botão B6 – calcular\_valores\_3\_(direcao) é para calcular os parâmetros por direção – análise direcional. São preenchidas as tabelas O4 e O5 - figura 4.7 e figura 4.8.

O botão B7 – é para desenhar os gráficos G1 e G2 – resultantes das análises mensais e direcionais. São feitos 10 gráficos, cinco para as análises por mês e cinco para as análises por direção. Os cinco gráficos das análises por mês são o gráfico do  $DES_{energia(mes)}$  – figura 4.9, o gráfico da  $\eta_{(mes)}$  – figura 4.10, o gráfico das energias(mes) – figura 4.11, o gráfico do  $REND_{(mes)}$  – figura 4.12 e o gráfico do  $FU_{(mes)}$  – figura 4.13. Os cinco gráficos das análises por direção são o gráfico do  $DES_{energia(ano)}$  – figura 4.14, o gráfico da  $\eta_{dir(ano)}$  – figura 4.15, o gráfico das energias(direcao) – figura 4.16, o gráfico do  $REND_{dir(ano)}$  – figura 4.17 e o gráfico do  $FU_{dir(ano)}$  – figura 4.18.

O botão B8 – é para desenhar os gráficos G3 – resultantes das análises em função da velocidade do vento. São feitos três gráficos, o gráfico do  $DES_{energia_{v_i}(ano)}$  – figura 4.19, o gráfico da  $\eta_{v_i(ano)}$  – figura 4.20 e o gráfico das energias(ano) em função da velocidade do vento – figura 4.21.

	Área varrida pelo rotor (m <sup>2</sup> )	6.3617e+03
	Fator de escala anual do vento não norm - c(m/s)	1
	Fator de forma anual do vento não norm - k	1
	Velocidade média anual vento não norm - (m/s)	6.4884
	Fator de forma anual do vento norm - k	1
	Fator de escala anual do vento norm - c(m/s)	1
Eq. 3.2.9	Velocidade média anual do vento norm (m/s)	6.4307
	Temperatura média anual (°C)	10.6324
Eq. 3.2.8	Pressão média anual (mbar)	796.6081
	MV média anual (kg/m <sup>3</sup> )	0.9782
Eq. 3.2.12	Energia anual disponível no vento norm (MWh/ano)	1.8793e+04
	Energia anual disponível no vento não norm (MWh/ano)	1.9189e+04
Eq. 3.2.11	Ereal(anual) produzida (MWh/ano)	5.8774e+03
Eq. 3.2.10	Eteorica(anual) norm (MWh/ano)	5.3330e+03
	Eteorica(anual) não norm (MWh/ano)	5.4107e+03
Eq. 3.2.16	DESEMPENHO(anual) norm (MWh/ano)	544.4738
	DESEMPENHO(anual) não norm (MWh/ano)	466.6852
Eq. 3.2.18	EFICIENCIA(anual) norm (%)	110.2096
	EFICIENCIA(anual) não norm (%)	108.6252
Eq. 3.2.13	Rendimento(anual) norm (%)	31.2739
	Rendimento(anual) não norm (%)	30.6292
	Utilização(anual) da P_nominal norm (horas)	2.5554e+03
Eq. 3.2.14	Facto Utilização(anual) da P_nominal norm (%)	29.1713
Eq. 3.2.15	Produtividade(anual) norm (kWh/m <sup>2</sup> )	923.8740
Eq. 3.2.17	DESEMPENHO(hora) norm (kW)	62.1545
	DESEMPENHO(hora) não norm (kW)	53.2746

Figura 4.4 - Figura da tabela 01 dos parâmetros de saída anuais

Na figura 4.4 da tabela 01 dos parâmetros de saída anuais pode visualizar-se a área varrida pelo rotor é 6362 m<sup>2</sup>, os fatores de forma e de escala do vento são 1 porque as respetivas funções estão desativadas (em Portugal têm-se fatores de forma normais de K= 2 e fatores de escala normais de c= 6 m/s).

Para o cálculo dos parâmetros anuais são aplicadas as equações de 3.2.8 até 3.2.18 com e sem a velocidade do vento normalizada.

Pode ver-se que a velocidade média do vento normalizada 6,4 m/s é inferior à velocidade do vento não normalizada 6,5 m/s, como era de esperar, pois a massa volúmica média anual de 0,978 Kg/m<sup>3</sup> é inferior à massa volúmica de referência de 1,015 Kg/m<sup>3</sup>.

A energia produzida pela TE no último ano foi de 5.877 MWh, superior ao que era previsto pelo fabricante de 5.333 MWh, por isso a TE teve no último ano uma eficiência média de 110 % e uma média anual do desempenho de 62 kW, isto é, a TE produziu em média por hora em relação ao planeado pelo fabricante mais 62 kWh de energia, o que corresponde ao fim de um ano a um excesso de produção de 544 MWh.

O rendimento da TE foi de 31 %, isto é, conseguiu converter em energia elétrica 31 % da energia disponível no vento de 18.793 MWh.

A TE teve, no último ano, uma utilização da potência nominal de 2.555 horas o que se traduz num fator de utilização de 29 %.

A produtividade da TE, no último ano, foi de 924 kWh/m<sup>2</sup>, isto é, cada m<sup>2</sup> da superfície varrida pelas pás produziu em média 924 kWh de energia.

	T(°C)	pr(mbar)	Vn(m/s)	c(m/s)	k	mv(kg/m^3)	EVn(MWh)	Eteorica(MWh)	Ereal(MWh)	DESEMPENHO(MWh)	EFICIENCIA(%)	rend(%)	f_u(horas)	f_u(%)		
-12	7.7388	800	Eq. 3.2.20			1		Eq. 3.2.23		Eq. 3.2.21	368	Eq. 3.2.28	Eq. 3.2.29	24.4613	Eq. 3.2.25	
-11	8.6021	800				1			360			30.9828				
-10	6.2109	800.0081	8.1303	1	1		662e+03	685		Eq. 3.2.22		84.2439	109	5.9680	43.8129	
-9	8.9480	773.7145	7.8430	1	1		830e+03	660		Eq. 3.2.22		46.6666	107	7.3260	42.6842	
-8	9.1025	799.6445	5.6258	1	1	0.9591	350.8702	316.1631	333.2236			37.0419	111.133	133.5781	20.6419	
-7	16.2290	800.0036	4.3522	1	1	0.9633	439.3874	151.8382	187.6301			35.7919	123.5724	81.5783	11.3303	
-6	16.0844	799.6450	4.8957	1	1	0.9634	542.5037	210.7802	252.3020			41.5218	119.6991	109.6965	14.7442	
-5	16.3581	791.7616	4.9617	1	1	0.9524	606.7360	240.9058	283.1243			42.2185	117.5249	123.0975	16.5454	
-4	14.6650	797.5922	4.5841	1	1	0.9654	730.5026	224.8612	256.6326			31.7714	114.1293	111.5794	15.4971	
-3	11.0748	799.9955	6.1706	1	1	0.9808	1.6405e+03	451.6620	490.5764			38.9144	108.6158	213.2941	28.6686	
-2	5.9733	799.8019	7.4312	1	1	0.9984	2.0017e+03	562.2620	618.1608			55.8988	109.9418	30.8822	268.7656	37.3286
-1	6.5039	796.9389	8.8186	1	1	0.9930	2.9309e+03	780.6043	835.0734			54.4691	106.9778	28.4924	363.0754	48.8005

Figura 4.5 - Figura da tabela O2 dos parâmetros de saída por mês

Para o cálculo dos parâmetros por mês são aplicadas as equações de 3.2.19 até 3.2.29 com a velocidade do vento normalizada.

	T(°C)	pr(mbar)	Vn(m/s)	c(m/s)	k	mv(kg/m <sup>3</sup> )	EVn(MWh)	Eteorica(MWh)	Ereal(MWh)	DESEMPENHO(MWh)	EFICIENCIA(%)	rend(%)	f_u(horas)	f_u(%)
ANUAL	10.6242	796.5931	6.4322	1	1	0.9782	1.8796e+04	5.3341e+03	5.8786e+03	544.5509	110.2089	31.2758	2.5558e+03	29.1772

Figura 4.6 - Figura da tabela O3 dos parâmetros anuais calculados a partir dos parâmetros por mês

Para confirmar os parâmetros mensais com os anuais foram aplicadas as equações de 3.2.30 até 3.2.37 com a velocidade do vento normalizada.

	Vn(m/s)	c(m/s)	k	mv(kg/m <sup>3</sup> )	EVn(MWh)	Eteorica(MWh)	Ereal(MWh)	DESEMPENHO(MWh)	EFICIENCIA(%)	rend(%)	f_u(horas)	f_u(%)
30	Eq. 3.2.39		Eq. 3.2.38		611.305	Eq. 3.2.40	Eq. 3.2.41	Eq. 3.2.46	Eq. 3.2.48	40.1831	1	Eq. 3.2.44
60										41.3771		
90	8.4012	1	1	0.9	Eq. 3.2.42		769.4479	840.5856	71.1377	109.2	165.4720	45.5985
120	7.3211	1	1	0.9			473.4987	528.2820	54.7833	111.5	229.6878	37.8398
150	5.8260	1	1	0.9763	688.1681	210.2492	236.4828	26.2336	112.4774	34.3641	102.8186	24.4709
180	7.0987	1	1	0.9807	1.9725e+03	462.3380	506.9699	44.6319	109.6535	25.7018	220.4217	34.0332
210	7.9902	1	1	0.9848	2.5959e+03	636.0126	688.7173	52.7047	108.2867	26.5307	299.4423	41.7341
240	7.2379	1	1	0.9876	1.8968e+03	481.7714	528.5303	46.7589	109.7056	27.8642	229.7958	34.6078
270	6.2380	1	1	0.9869	1.3229e+03	373.8298	394.1284	20.2985	105.4299	29.7928	171.3602	27.0997
300	5.6288	1	1	0.9824	1.6377e+03	489.3538	528.4437	39.0899	107.9881	32.2683	229.7581	21.8436
330	5.7995	1	1	0.9813	1.8707e+03	633.7452	704.9523	71.2071	111.2359	37.6840	306.5010	22.4707
360	5.8838	1	1	0.9819	1.3408e+03	480.9133	547.8733	66.9600	113.9235	40.8632	238.2058	25.4720

Figura 4.7 - Figura da tabela O4 dos parâmetros de saída por direção

Para o cálculo dos parâmetros por direção são aplicadas as equações de 3.2.38 até 3.2.48 com a velocidade do vento normalizada.

	Vn(m/s)	c(m/s)	k	mv(kg/m <sup>3</sup> )	EVn(MWh)	Eteorica(MWh)	Ereal(MWh)	DESEMPENHO(MWh)	EFICIENCIA(%)	rend(%)	f_u(horas)	f_u(%)
ANUAL	6.3954	1	1	0.9770	1.8793e+04	5.3330e+03	5.8774e+03	544.4738	110.2096	31.2739	2.5554e+03	29.1713

Figura 4.8 - Figura da tabela O5 dos parâmetros anuais calculados a partir dos parâmetros por direção

Para confirmar os parâmetros direcionais com os anuais foram aplicadas as equações de 3.2.49 até 3.2.56 com a velocidade do vento normalizada.

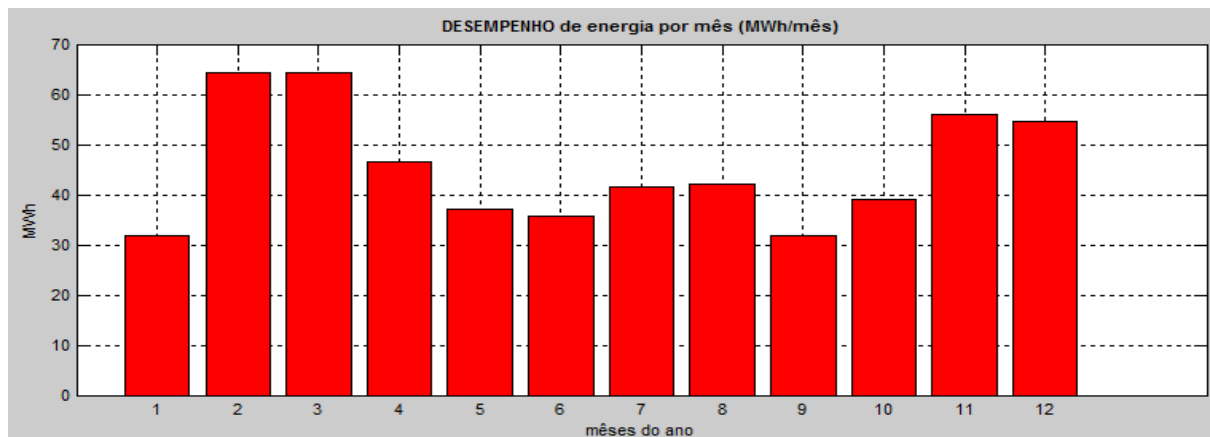


Figura 4.9 - Gráfico do  $DES_{energia(mes)}$

Observa-se nos gráficos das figuras 4.9 e 4.10, em complemento da tabela da figura 4.5, que o desempenho e a eficiência da TE nos últimos 12 meses foi sempre positivo, isto é, a TE esteve a produzir eletricidade na realidade sempre acima do que na teoria era esperado. A eficiência da TE foi máxima no mês 6 – 124 %, ou seja a TE produziu no mês 6 mais 24 % de eletricidade do que seria teoricamente normal.

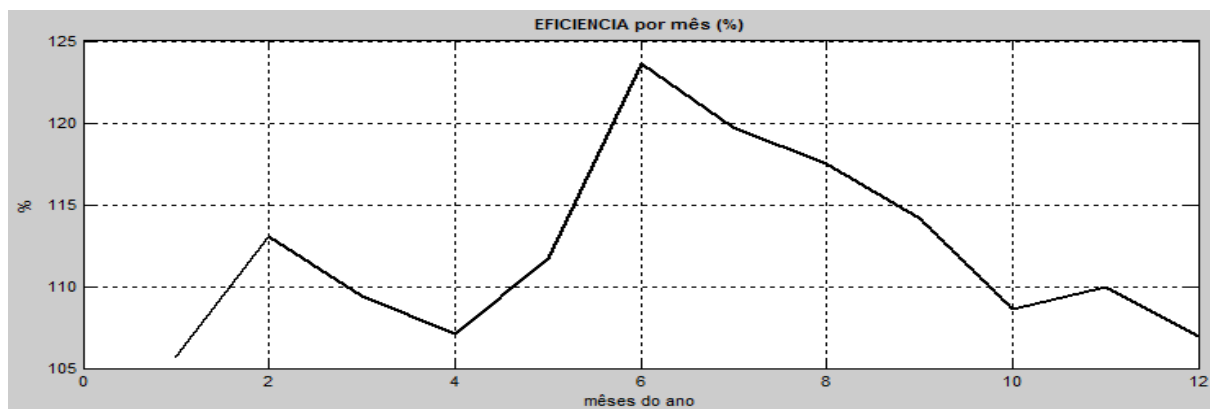


Figura 4.10 - Gráfico da  $\eta_{(mes)}$

Na figura 4.11, de acordo com a tabela da figura 4.5, verifica-se que a energia disponível no vento é máxima no mês 12 de 2.903 MWh e mínima no mês 6 de 439 MWh. A energia real produzida pela TE é máxima no mês 12 de 835 MWh e mínima no mês 6 de 188 MWh. A energia teórica que a TE deveria produzir, de acordo com a curva de potência do fabricante para a MV de referência, é máxima no mês 12 de 781 MWh e mínima no mês 6 de 152 MWh.



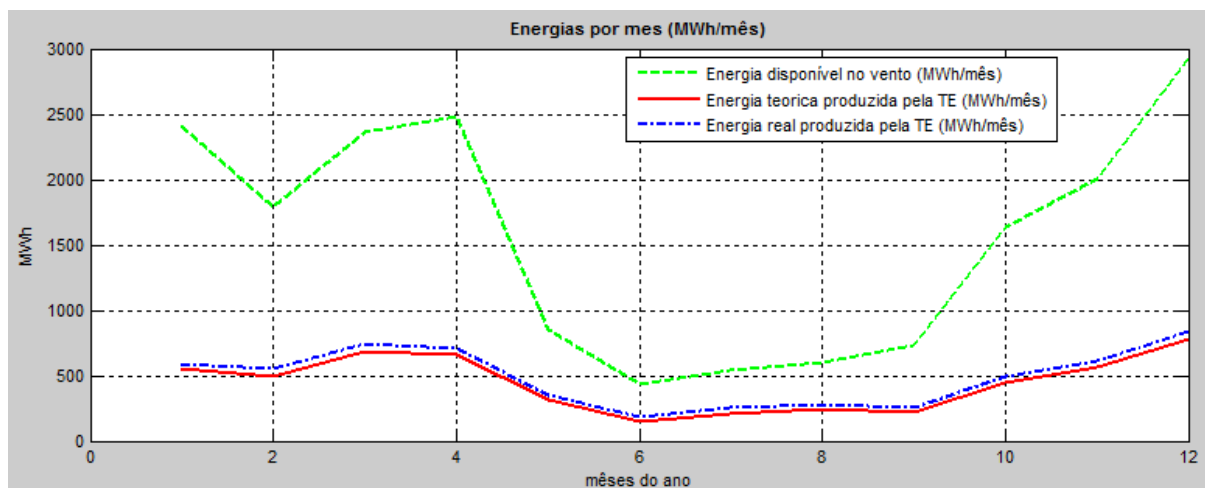


Figura 4.11 - Gráfico das  $EVn_{(mes)}$ ,  $Er_{(mes)}$  e  $Et_{(mes)}$

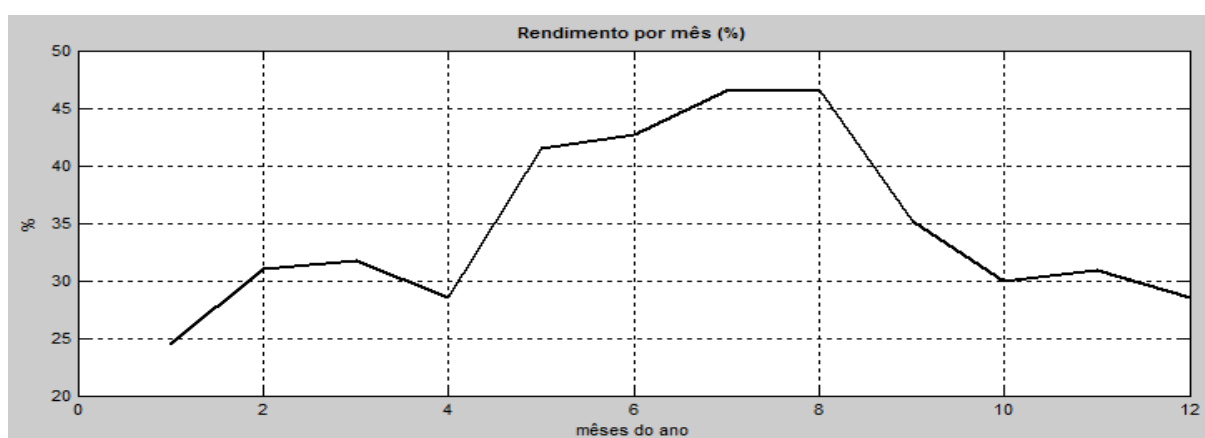


Figura 4.12 - Gráfico do  $REND_{(mes)}$

Observa-se que a figura 4.13 do fator de utilização por mês é quase um espelho da figura 4.12 do rendimento por mês da TE, isto é, enquanto nos meses 5, 6, 7, 8 e 9 o rendimento é máximo, o fator e utilização é mínimo e vice-versa.

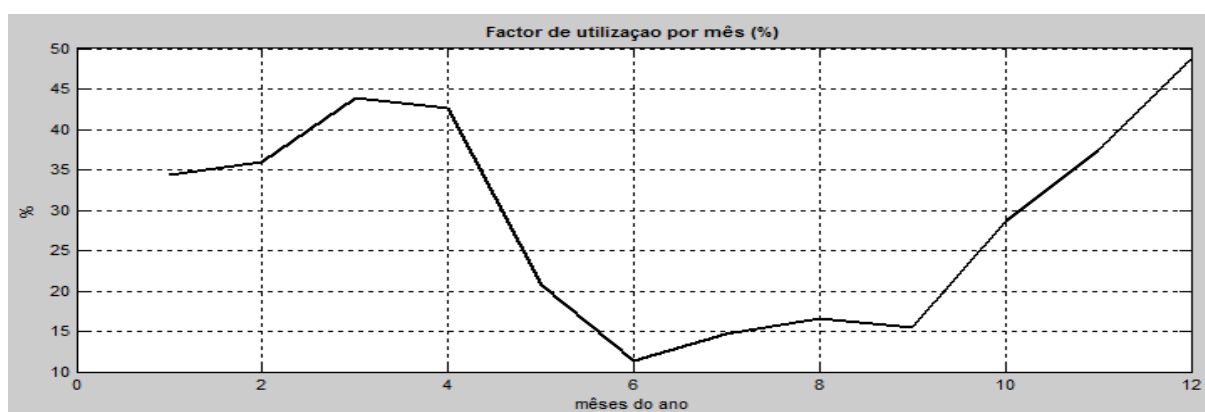


Figura 4.13 - Gráfico do  $FU_{(mes)}$

Os próximos cinco gráficos mostram que não existe nenhuma direção predominante do vento, nem nenhuma direção cujo desempenho e a eficiência da TE sejam muito distintos.

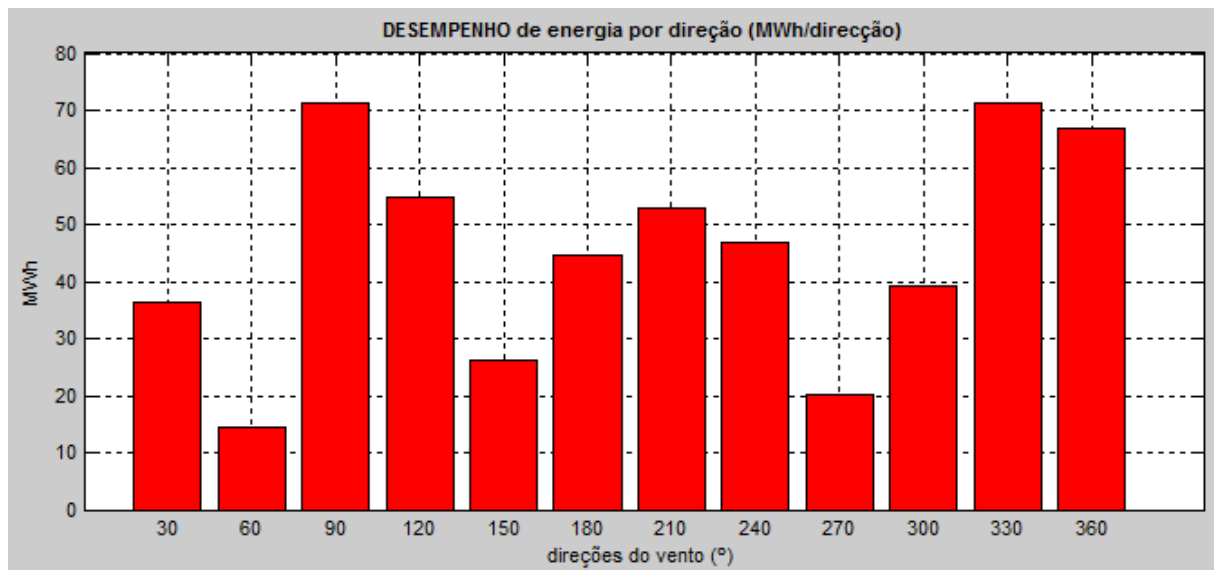


Figura 4.14 - Gráfico do  $DES_{energia_{dir(ano)}}$

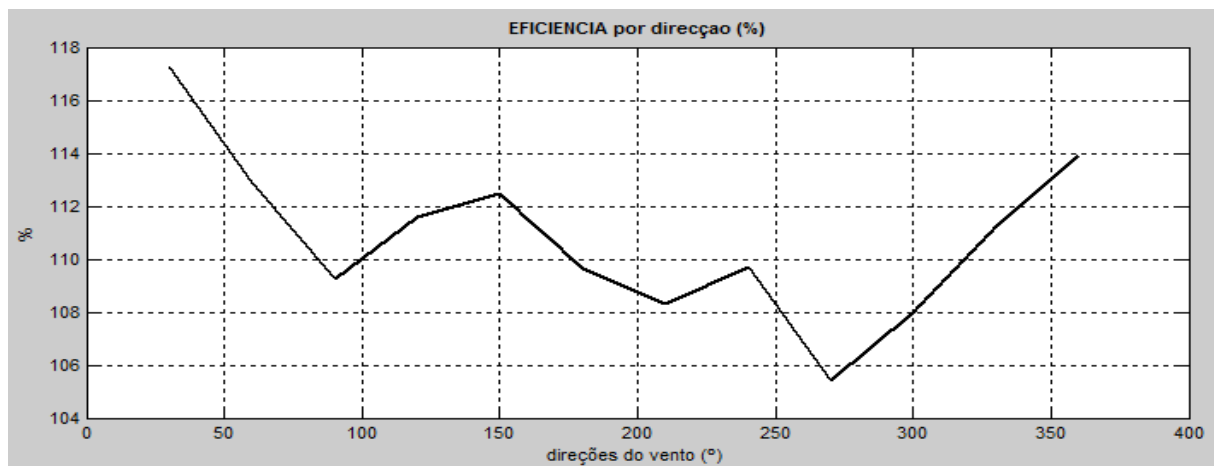


Figura 4.15 - Gráfico da  $\eta_{dir(ano)}$

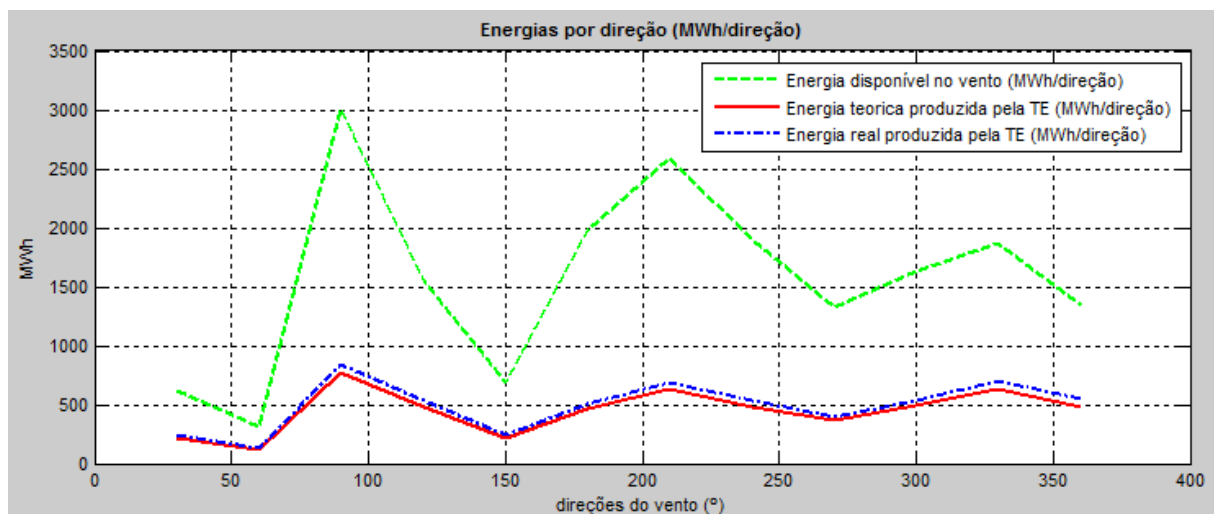


Figura 4.16 - Gráfico das  $EV_{n_{dir(ano)}}$ ,  $Er_{dir(ano)}$  e  $Et_{dir(ano)}$

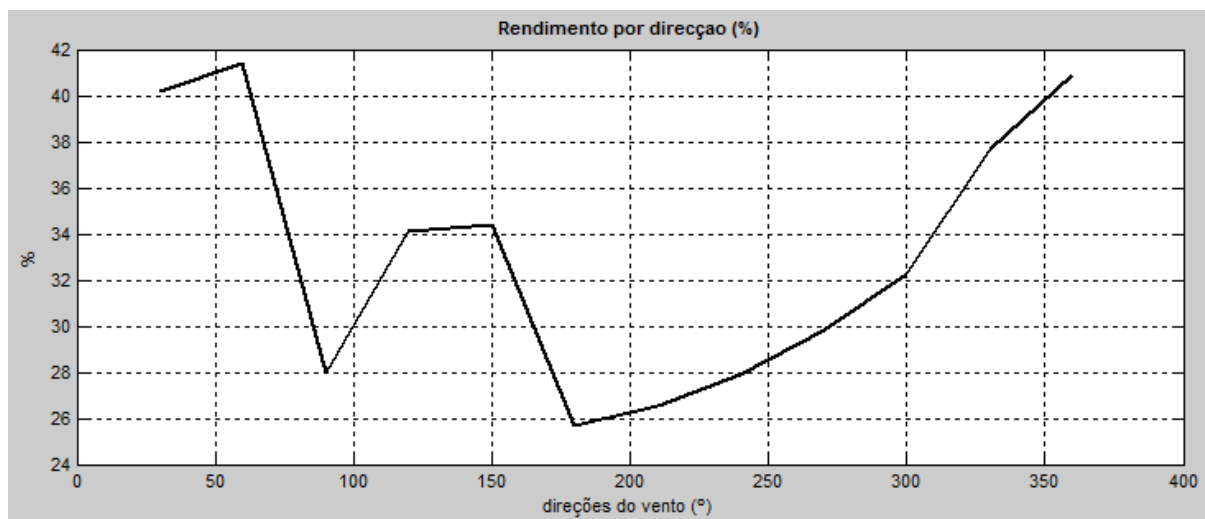


Figura 4.17 - Gráfico do  $REND_{dir(ano)}$

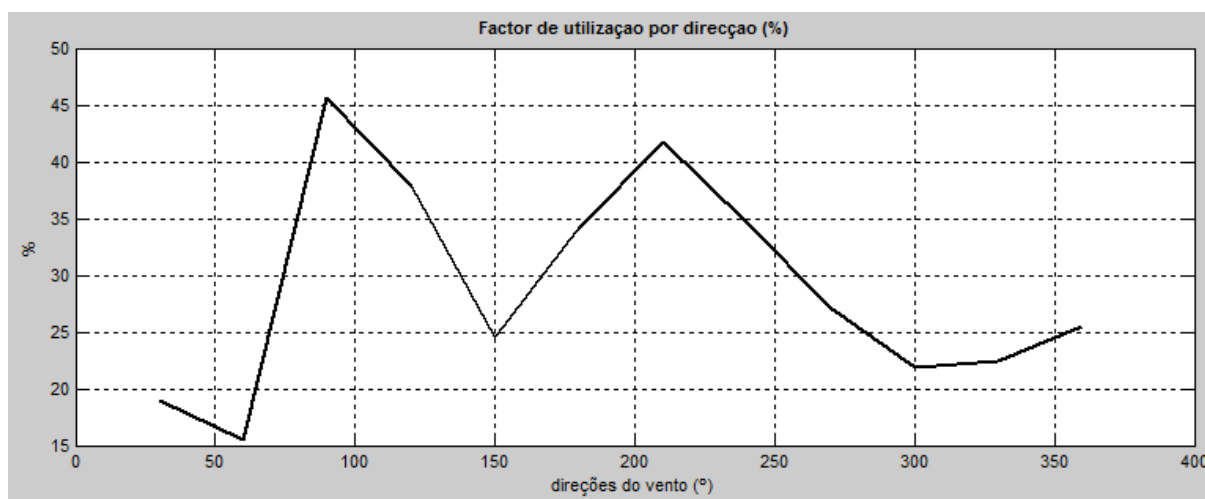


Figura 4.18 - Gráfico do  $FU_{dir(ano)}$

Para os cálculos do desempenho energético da TE, para um período de um ano e para cada intervalo de velocidade do vento normalizada é aplicada a equação 3.2.60.

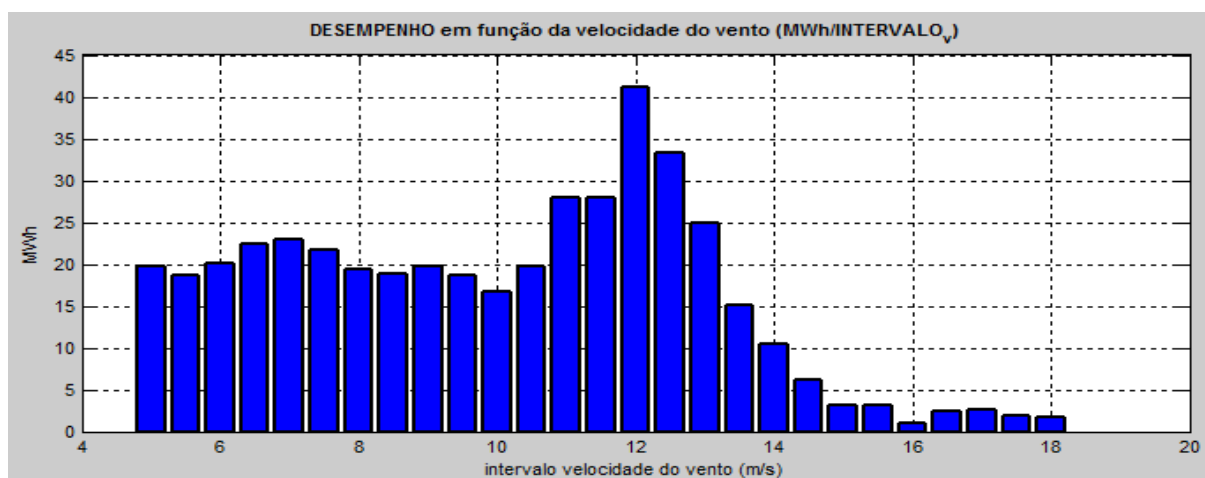


Figura 4.19 - Gráfico do  $DES_{energia_{vi(ano)}}$

Para os cálculos da eficiência da TE, para um período de um ano e para cada intervalo de velocidade do vento normalizada é aplicada a equação 3.2.61.

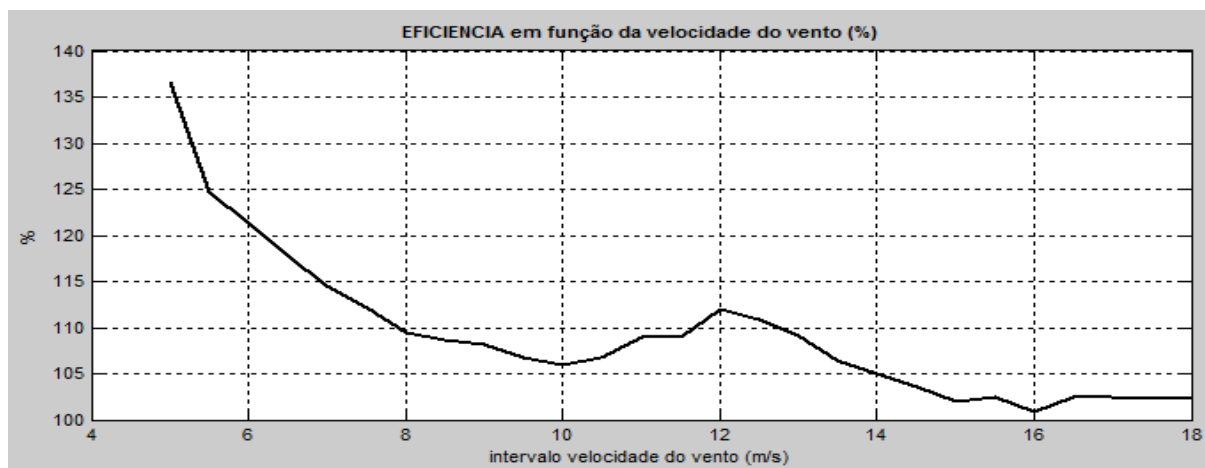


Figura 4.20 - Gráfico da  $\eta_{Vi(ano)}$

Para os cálculos da energia teórica que a TE devia produzir, da energia real produzida pela TE e da energia disponível no vento, para um período de um ano, para cada intervalo de velocidade do vento normalizada são aplicadas as equações 3.2.57, 3.2.58 e 3.2.59.

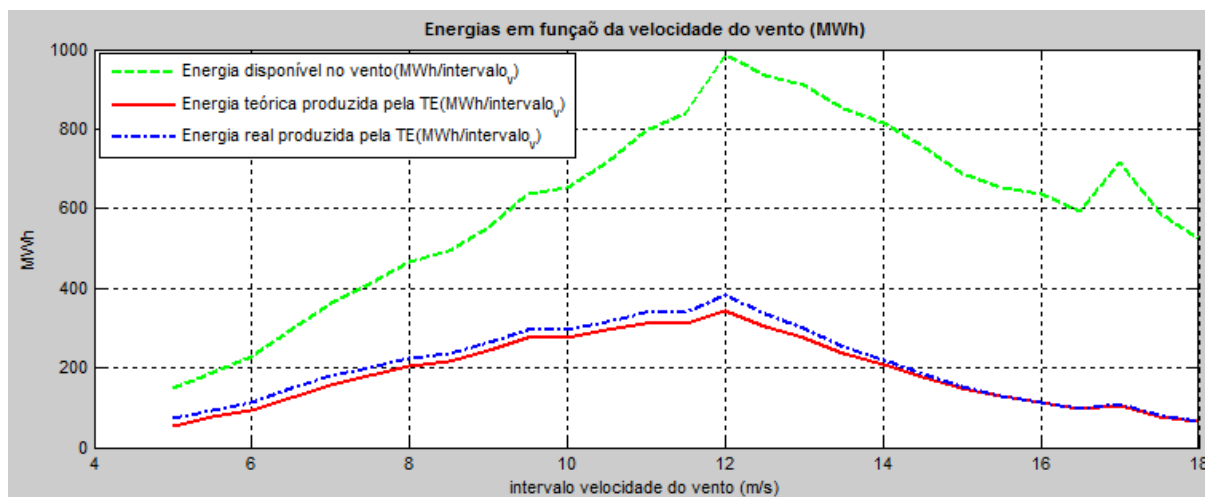


Figura 4.21 - Gráfico das  $EV_{Vi(ano)}$ ,  $Er_{Vi(ano)}$  e  $Et_{Vi(ano)}$

Observa-se na figura 4.21 que a energia teórica que a TE devia produzir, que a energia real produzida pela TE e que a energia disponível no vento aumenta com o aumento da velocidade do vento até 12 m/s e depois diminui. A energia real produzida pela TE é máxima no intervalo de velocidade do vento de 11,75 a 12,25 m/s cerca de 380 MWh.

Na zona 3 é aplicada a metodologia 3. O botão B9 – Modelo Anual/Semanal é para calcular a variação da média e do desvio padrão do desempenho ao longo das últimas 52 semanas, a previsão para as próximas 5 semanas e para desenhar os dois gráficos G4. O gráfico da variação da média do desempenho ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas - figura 4.22 e o gráfico variação do desvio padrão do desempenho ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas – figura 4.23.

Na zona 4 é aplicada a metodologia 4. O botão B10 – Modelo Mensal/Diário é para calcular a variação da média e do desvio padrão do desempenho ao longo dos últimos 31 dias, a previsão para os próximos 7 dias, para desenhar o gráfico da variação da média do desempenho ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias - figura 4.24 e o gráfico variação do desvio padrão do desempenho ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias – figura 4.25.

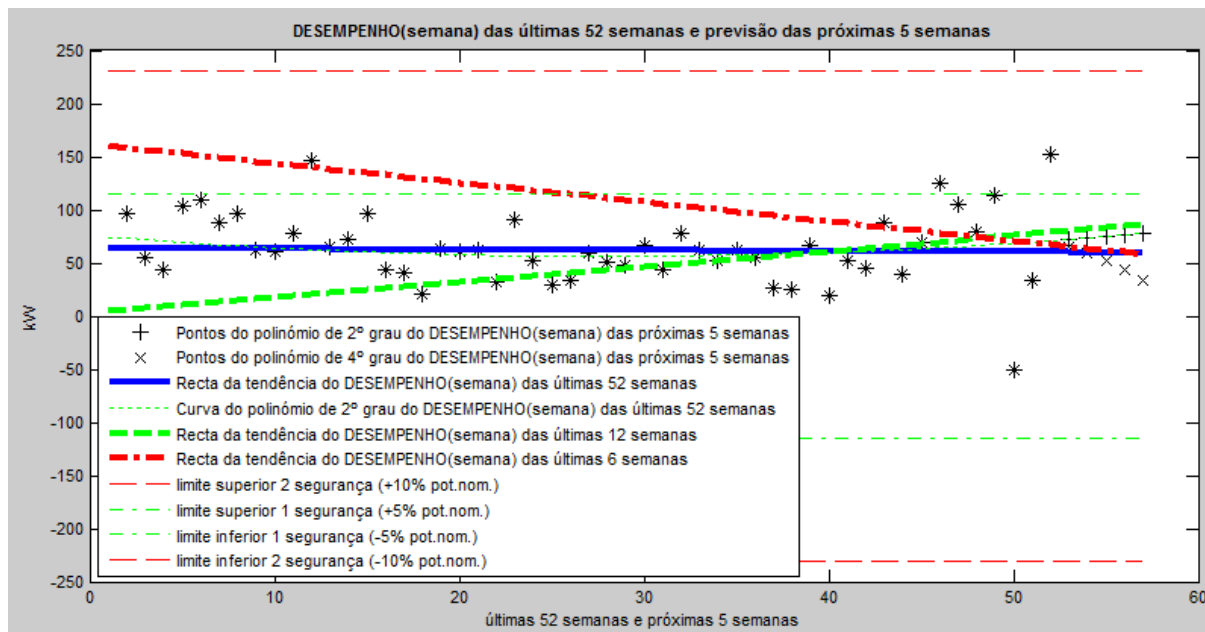


Figura 4.22 - Gráfico da variação do **DES<sub>(semana)</sub>** ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas

Observa-se na figura 4.22 que a média semanal do desempenho da TE ao longo das últimas 52 semanas manteve-se relativamente constante, com tendência nula, à volta de 62 kW, isto é a TE produziu em média por hora ao longo do último ano mais 62 kWh do que seria de esperar de acordo com o fabricante da TE, o que corresponde a uma produção excedentária média de 10,4 MWh por semana e de 544 MWh no último ano, o que confirma os valores anuais da tabela da figura 4.4, por isso prevê-se que nas próximas a média semanal do desempenho permaneça igual à volta dos 62 kW.

Observa-se também que na semana 50 a TE teve um desempenho médio semanal de -50 kW, por isso produziu -8,4 MWh de energia do que seria de esperar pelo fabricante e -18,4 kW do que foi normal ao longo de todo o ano.

Verifica-se também que as três retas da tendência da média do desempenho semanal têm inclinações antagónicas, a reta da tendência das últimas 52 semanas é horizontal, a reta da tendência das últimas 12 semanas tem inclinação positiva e a reta da tendência das últimas 6 semanas tem inclinação negativa, ou seja, estão a dar sinais contraditórios para prever a média do desempenho semanal nas próximas semanas.

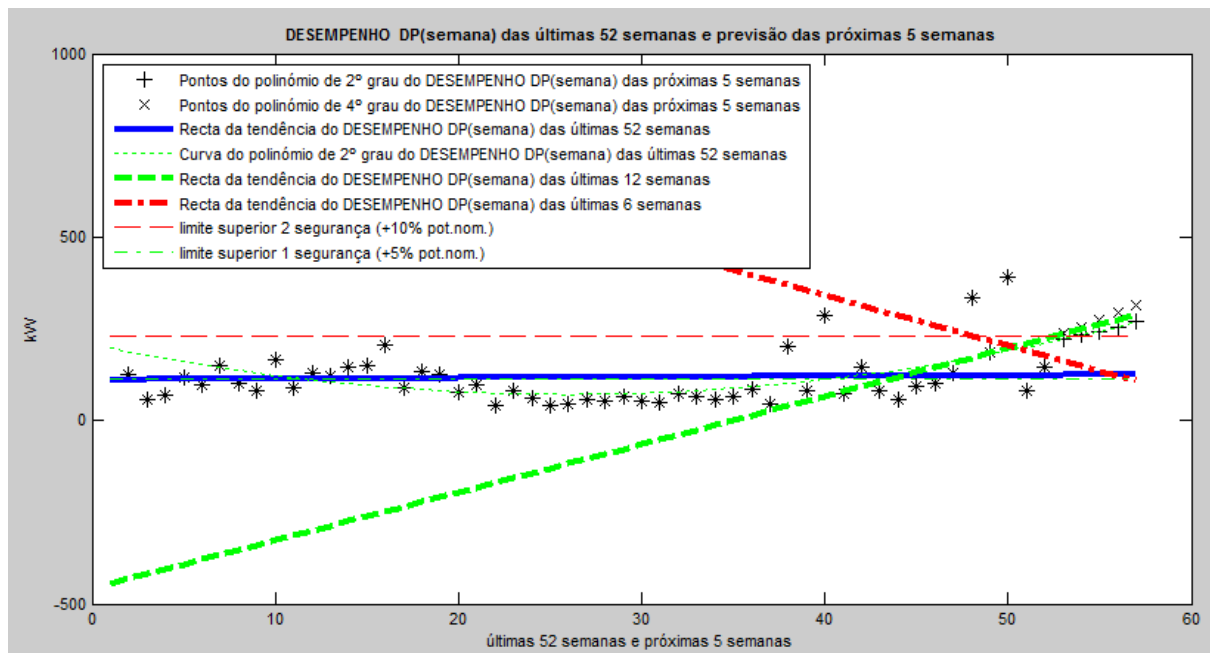


Figura 4.23 - Gráfico da variação do  $\sigma_{DES(sem)}$  ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas

Verifica-se na figura 4.23 que as três retas da tendência do desvio padrão do desempenho semanal têm inclinações opostas, a reta da tendência das últimas 52 semanas tem inclinação ligeiramente positiva, a reta da tendência das últimas 12 semanas tem inclinação acentuadamente positiva e a reta da tendência das últimas 6 semanas tem inclinação muito negativa, ou seja, estão a dar sinais contraditórios para o futuro funcionamento da TE.

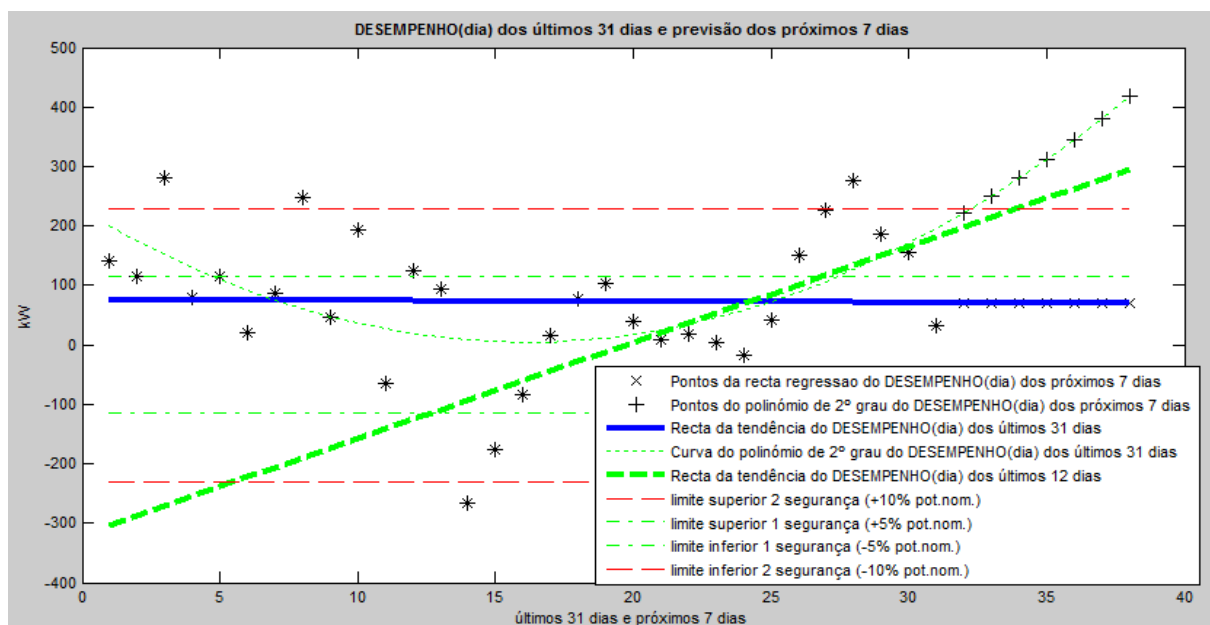


Figura 4.24 - Gráfico da variação do  $DES_{(dia)}$  ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias

Observa-se na figura 4.24 que a média diária do desempenho da TE no dia 14 foi -270 kW, inferior ao limite inferior 2 de segurança (-10 % da potência nominal da TE = - 230 kW). Verifica-se que a tendência da média diária do desempenho da TE dos últimos 31 dias é quase nula ao invés da tendência da média diária do desempenho da TE dos últimos 12 dias que é

positiva, sinalizando uma melhoria do funcionamento da TE para os próximos dias, se nada de anormal acontecer.

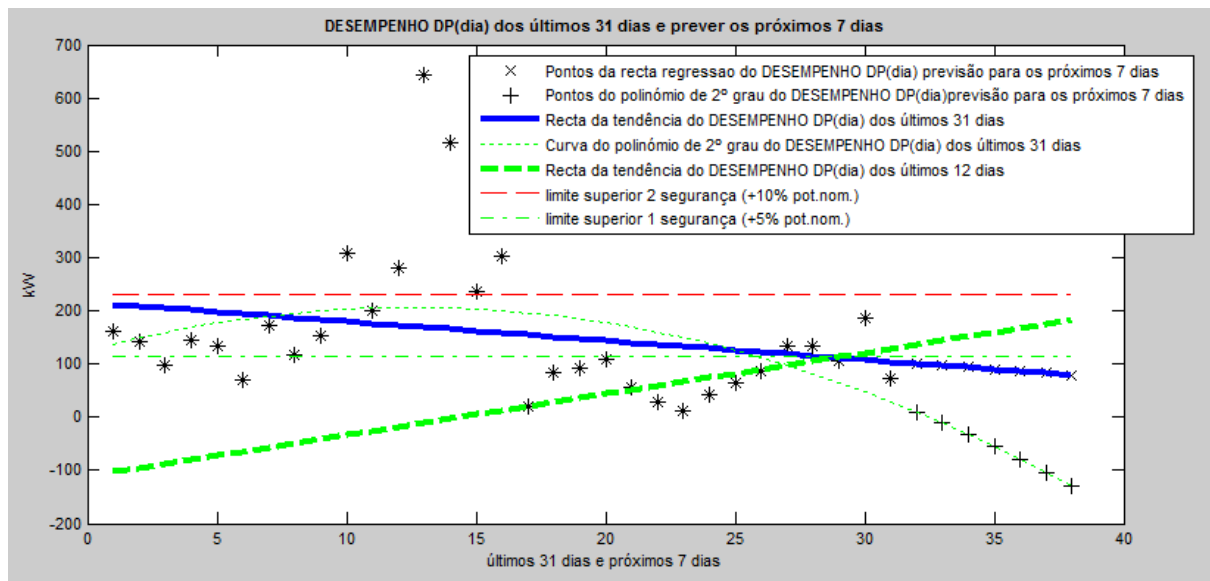


Figura 4.25 - Gráfico da variação do  $\sigma_{DES(dia)}$  ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias

Observa-se na figura 4.25 que o desvio padrão diária do desempenho da TE nos dias 13 e 14 foram muito elevados, de 650 kW e 500 kW, muito superior ao limite superior 2 de segurança (+10 % da potência nominal da TE = 230 kW), por isso deve ter ocorrido algum acontecimento anormal nesses dias. Verifica-se também uma sinalização contrária das retas de tendência para o funcionamento futuro da TE.

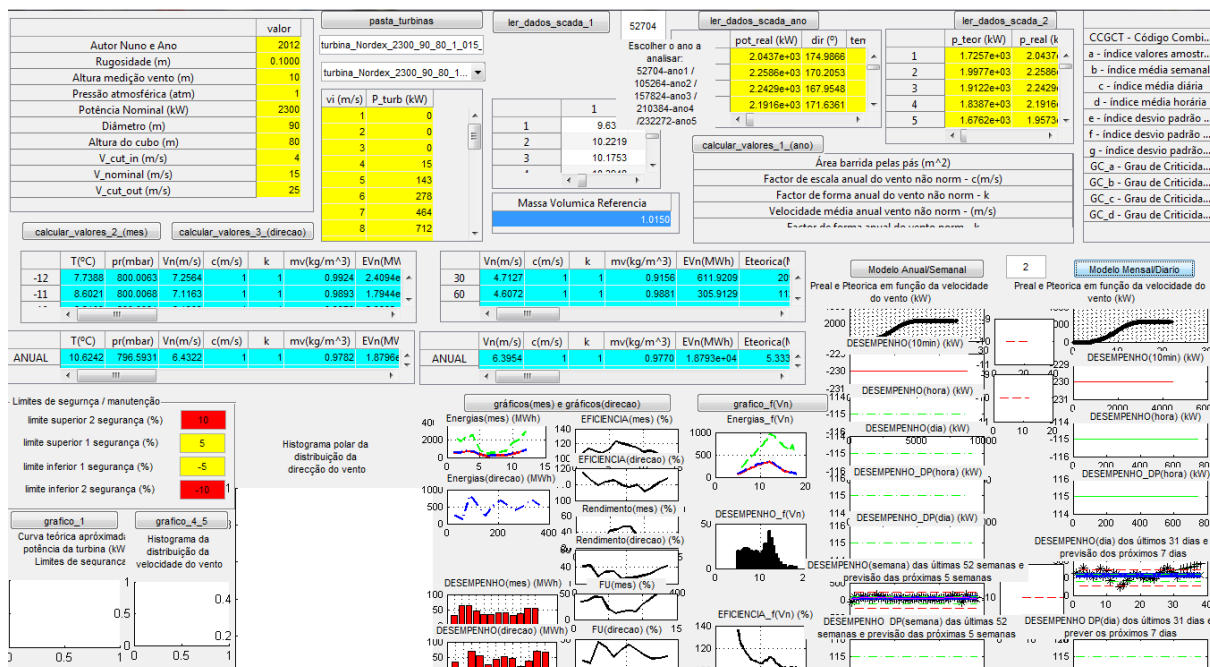


Figura 4.26 - Figura principal final do programa AnalíTE2

#### 4.3. Programas AnalíTE\_CEP\_52semanas e AnalíTE\_CEP\_31dias (com filtros)

Os programas AnalíTE\_CEP\_52semanas e o programa AnalíTE\_CEP\_31dias aplicam as metodologias 5 e 6. O intuito destes dois programas é poder comparar os resultados obtidos nas metodologias 5 e 6, com filtros, com os resultados obtidos no AnalíTE2 com as metodologias 3 e 4, sem filtros, principalmente na tendência do desempenho e da eficiência da TE para as próximas semanas e para os próximos dias.

Os dois programas são muito parecidos em termos de ambiente de trabalho inicial e no modo de funcionamento, por isso vai ser explanado só o programa AnalíTE\_CEP\_52semanas. A figura 4.27 ilustra o ambiente de trabalho inicial.

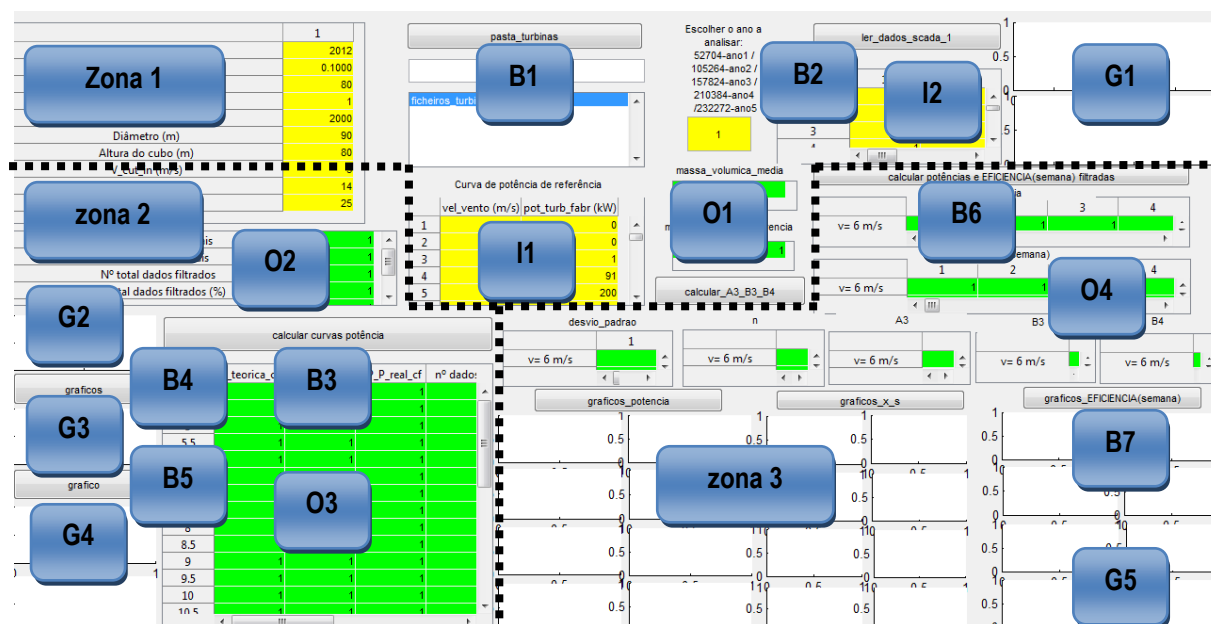


Figura 4.27 - Figura principal inicial do programa AnalíTE\_CEP\_52semanas

A figura principal está dividida em três zonas. A zona 1 dos *inputs* possibilita carregar os dados da TE, a curva de potência de referência da TE, a MV de referência e os dados do SCADA. A zona 2 permite fazer uma análise anual da potência real, da potência teórica e da eficiência da TE, em função da velocidade do vento, com e sem filtros. A zona 3 dos *outputs* da metodologia 5.

Na zona 1 o botão B1- é para ler o ficheiro das características e da curva de potência de referência da TE, neste caso da TE Nordex\_2300\_90\_80\_1\_015 ( $\rho_{\text{ref}} = 1,015 \text{ kg/m}^3$  - Anexo M) e preencher a tabela I1.

O botão B2 – é para ler e preencher com os dados do SCADA do ano a analisar a tabela I2. É também preenchida a tabela O1 da MV média do ano a analisar e são executados os gráficos G1 da potência real (10min) e da eficiência anual da TE, em função da velocidade do vento, sem filtros, que podem ser ampliados clicando no botão ampliar gráfico para obter os gráficos da figura 4.28 e da figura 4.29.



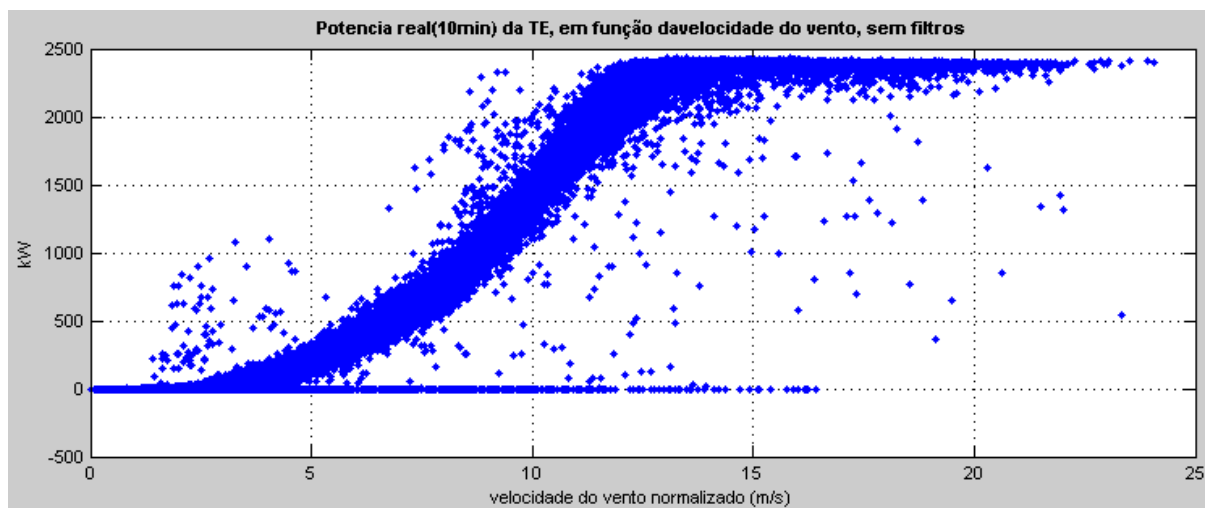


Figura 4.28 - Gráfico da  $Pr_{Vi(10min)}$  da TE, sem filtros

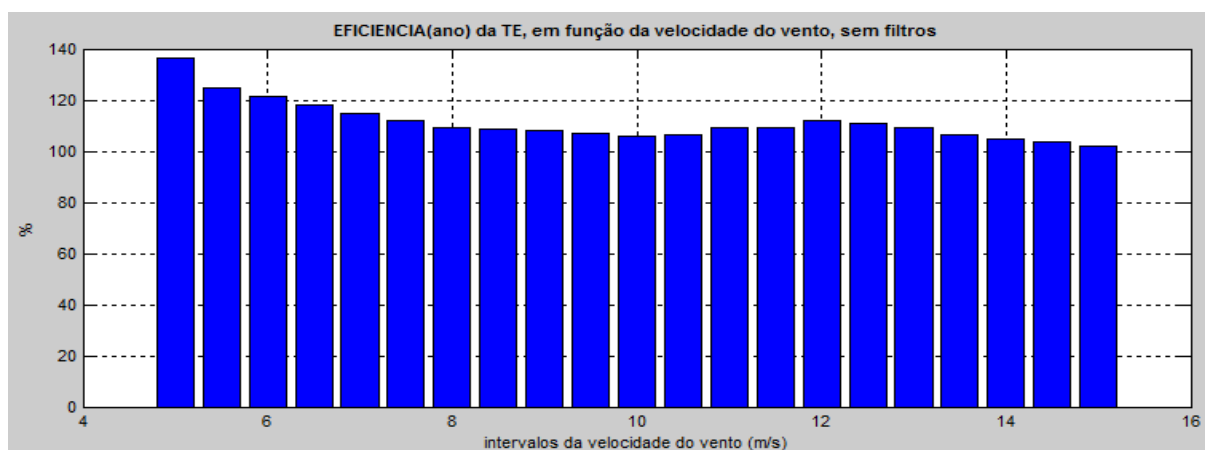


Figura 4.29 - Gráfico da  $\eta_{Vi(ano)}$  da TE, sem filtro

Na zona 2 o botão B3 – é para calcular os parâmetros anuais da potência real média, da potência teórica média, do desvio padrão da potência real e da eficiência, com filtros e em função da velocidade do vento. São preenchidas a tabela 02 com os números dos dados filtrados - figura 4.30, a tabela 03 das potências e eficiências - figura 4.31 e é executado o gráfico G2 das curvas de potência teóricas do fabricante para  $\rho_{(ref)}=1,015 \text{ Kg/m}^3$  e  $\rho=1,225 \text{ Kg/m}^3$  e da potência real (10min) da TE em função da velocidade do vento, com filtros – figura 4.32.

Nº total dados iniciais	52416
Nº total dados finais	29124
Nº total dados filtrados	23292
Nº total dados filtrados (%)	44.4368

Figura 4.30 - Figura da tabela 02 do número de dados filtrados

Observa-se na tabela 02 da figura 4.30 que das 52416 linhas de dados do *SCADA*, dum ano, foram filtradas 29.124 linhas, isto é só foram considerados válidos (no 1º e 2º filtro) 223.292 linhas de dados do *SCADA* (44,4 % dos dados).

	P_teorica_cf	P_real_cf	DP_P_real_cf	nº dados_f	EFICIENCIA_cf	P_real_sf	EFICIENCIA_sf	DP_P_real_sf
4	18.4630	46.1758	28.6829	543	250.0987	94.6458	586.9084	50.3987
4.5	78.7072	117.3810	31.6502	941	149.1363	143.7212	191.4305	54.9994
5	143.2395	184.6158	31.0491	1486	128.8861	194.3821	136.6253	56.5582
5.5	208.1778	250.7702	36.3912	1538	120.4596	259.3411	124.6439	68.4599
6	278.5309	327.3475	40.5841	1445	117.5265	337.7160	121.3432	80.1522
6.5	364.0298	421.0731	47.9327	1582	115.6700	429.2745	117.8320	88.7885
7	464.5444	526.1747	55.6341	1524	113.2668	532.1574	114.5633	107.0211
7.5	580.7919	646.2612	65.4467	1515	111.2724	650.4567	112.1209	118.7720
8	710.5084	777.9692	79.0941	1403	109.4947	777.2935	109.3988	146.3900
8.5	855.9245	928.6260	87.4249	1213	108.4939	931.0129	108.6713	180.1491
9	1.0149e+03	1.0974e+03	93.9218	1177	108.1341	1.0965e+03	108.1191	193.5790
9.5	1.1795e+03	1.2698e+03	102.3791	1131	107.6637	1.2594e+03	106.7665	219.4523
10	1.3427e+03	1.4448e+03	106.9681	969	107.6044	1.4229e+03	106.0013	231.9458
10.5	1.5027e+03	1.6261e+03	104.5327	920	108.2135	1.6009e+03	106.6278	253.6391
11	1.6523e+03	1.8135e+03	106.4595	890	109.7555	1.8005e+03	108.9574	240.5975
11.5	1.7901e+03	1.9800e+03	124.2175	823	110.6111	1.9491e+03	108.9144	321.2576
12	1.9098e+03	2.1513e+03	113.6389	911	112.6464	2.1382e+03	111.9935	218.9646
12.5	2.0063e+03	2.2658e+03	115.8939	759	112.9307	2.2270e+03	110.9896	288.4034
13	2.0946e+03	2.3183e+03	102.0745	655	110.6836	2.2861e+03	109.1017	266.5123
13.5	2.1700e+03	2.3501e+03	84.6680	523	108.2975	2.3078e+03	106.3478	300.4331
14	2.2309e+03	2.3642e+03	70.1785	461	105.9746	2.3404e+03	104.9394	221.2956
14.5	2.2725e+03	2.3702e+03	62.4979	382	104.2980	2.3512e+03	103.4599	211.4576
15	2.2992e+03	2.3775e+03	58.9861	311	103.4062	2.3445e+03	101.9817	244.4534

Figura 4.31 - Figura da tabela 03 das  $Pr_{Vi(ano)}$ ,  $Pt_{Vi(ano)}$ ,  $\sigma_{DES_{Vi(ano)}}$  e  $\eta_{Vi(ano)}$ , com e sem filtros

Observa-se na tabela 03 da figura 4.31 que por exemplo para a velocidade do vento normalizada igual a 10 m/s (valores da velocidades do vento normalizado entre 9,75 e 10,25 m/s) existem 969 valores válidos. A potência teórica do fabricante é 1.343 kW (para  $\rho_{(ref)} = 1,015 \text{ Kg/m}^3$ ). A potência real com filtros é 1.445 kW e sem filtros é 1.423 kW, o desvio padrão da potência real com filtros é 107 kW e sem filtros é 232 kW. A eficiência com filtros é 108 % e sem filtros é 106 % (para os dados *SCADA* deste ano e desta TE).

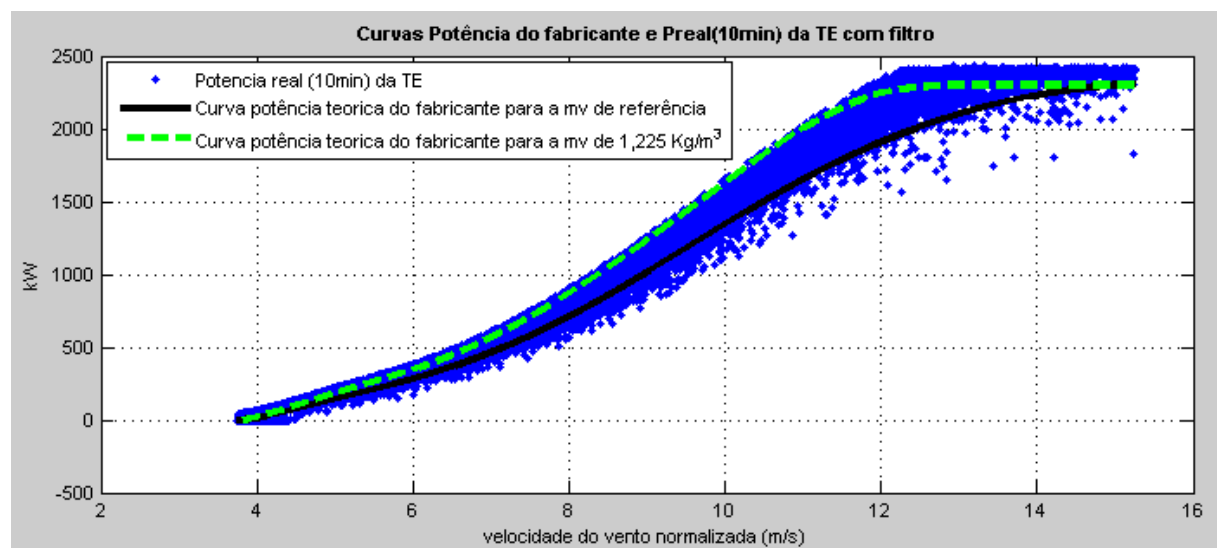


Figura 4.32 - Gráfico da  $Pr_{Vi(10min)}$  da TE, com filtros e as curvas de potência do fabricante para  $\rho_{(ref)} = 1,015 \text{ Kg/m}^3$  e  $\rho = 1,225 \text{ Kg/m}^3$

Observa-se no gráfico da figura 4.32 em comparação com o gráfico da figura 4.28 que muitos registos da potência real (10min) do *SCADA* da TE não aparecem, isto é foram

considerados não válidos. Por outro lado verifica-se que os pontos da potência real (10min) da TE estão em maioria acima da curva de potência teórica do fabricante para a MV de referência de  $1,015 \text{ Kg/m}^3$ .

O botão B4 – é para desenhar o gráfico G3 – da eficiência anual da TE em função da velocidade do vento, com filtro – figura 4.33.

Observa-se que tanto os gráficos das figuras 4.29 e 4.33 são muito parecidos com o gráfico da figura 4.20 do AnliTE2.

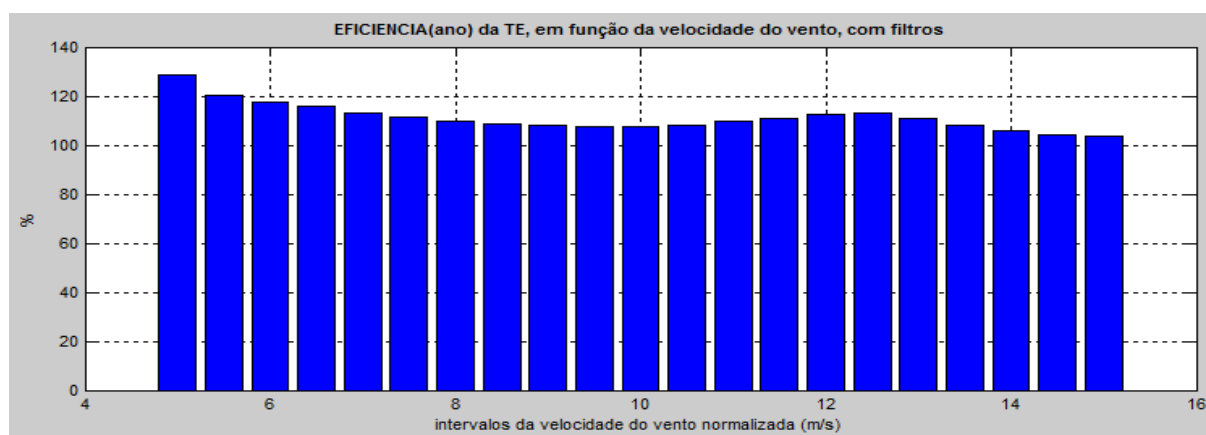


Figura 4.33 - Gráfico da  $\eta_{Vi(\text{ano})}$  da TE, com filtros

O botão B5 – é para desenhar o gráfico G3 – da curva de potência real, sem filtro, a curva de potência real, com filtros e a curva de potência teórica do fabricante para a MV do ar de referência (neste caso  $\rho_{(\text{ref})} = 1,015 \text{ Kg/m}^3$ ) – figura 4.34. Nesta figura observa-se que no último ano as curvas da potência real estão acima da curva da potência teórica, o que significa que a TE no último ano produziu a mais do que o esperado, logo com desempenho e eficiência positivos.

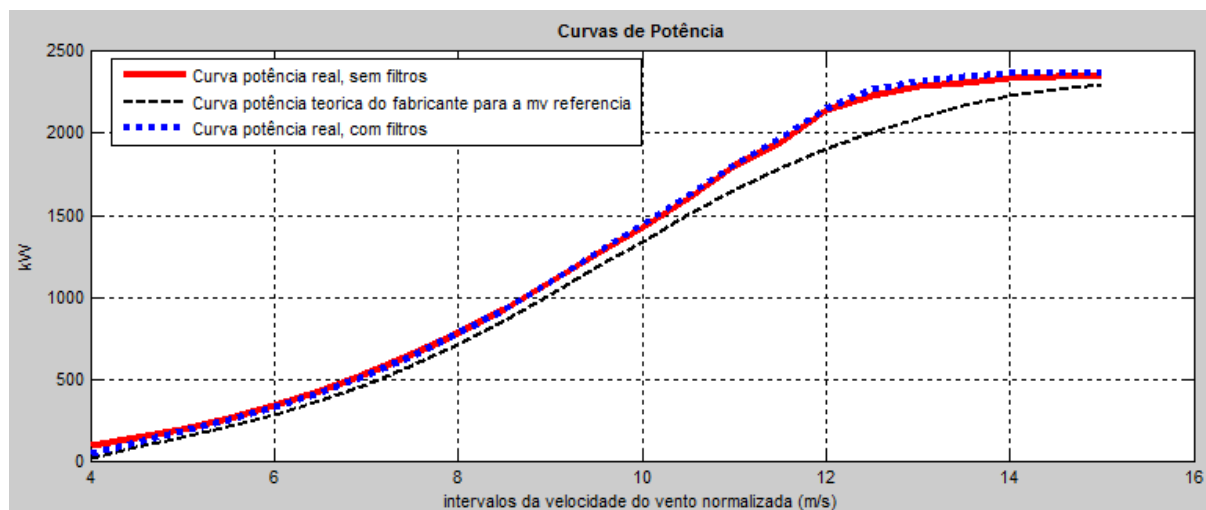


Figura 4.34 - Gráfico da curva de potência real, sem filtro, curva de potência real, com filtros e curva de potência teórica do fabricante para a MV do ar de referência (neste caso  $\rho_{(\text{ref})} = 1,015 \text{ Kg/m}^3$ )

A zona 3 o botão B6 – é para correr os procedimentos da metodologia 5, calcular a eficiência da TE nas últimas 52 semanas (com filtros), para os intervalos da velocidade do vento de 6 –  $[5,75:6,25]$ , 8 –  $[7,75:8,25]$ , 10 –  $[9,75:10,25]$  e 12 –  $[11,75:12,25]$  m/s. É preenchida a tabela O4 – figura 4.35.

O botão B7 – é para desenhar os gráficos G5 – quatro gráficos da variação da eficiência semanal da TE ao longo das últimas 52 semanas e quatro gráficos da tendência da eficiência semanal da TE das últimas 52 semanas e previsão das próximas 5 semanas para os intervalos de velocidade do vento de 6 – [5,75:6,25], 8 – [7,75:8,25], 10 – [9,75:10,25] e 12 – [11,75:12,25] m/s – exemplo figura 4.36 e figura 4.37 para o intervalo de velocidade do vento de 12 – [11,75:12,25] m/s.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
v= 6 m/s	1.1817	1.2160	1.1947	1.1111	1.2148	1.2235	1.2028	1.2703	1.20
v= 8 m/s	1.0970	1.1146	1.0813	1.1354	1.1384	1.1595	1.1058	1.1916	1.16
v= 10 m/s	1.0886	1.0809	1.0626	1.0809	1.0977	1.0973	1.0475	1.1452	1.10
v= 12 m/s	1.0965	1.1095	1.1311	1.1713	1.1200	1.1711	1.1567	1.1710	1.09

Figura 4.35 - Figura da tabela 04 da  $\eta_{vi( semana)}$  da TE nas últimas 52 semanas, com filtros

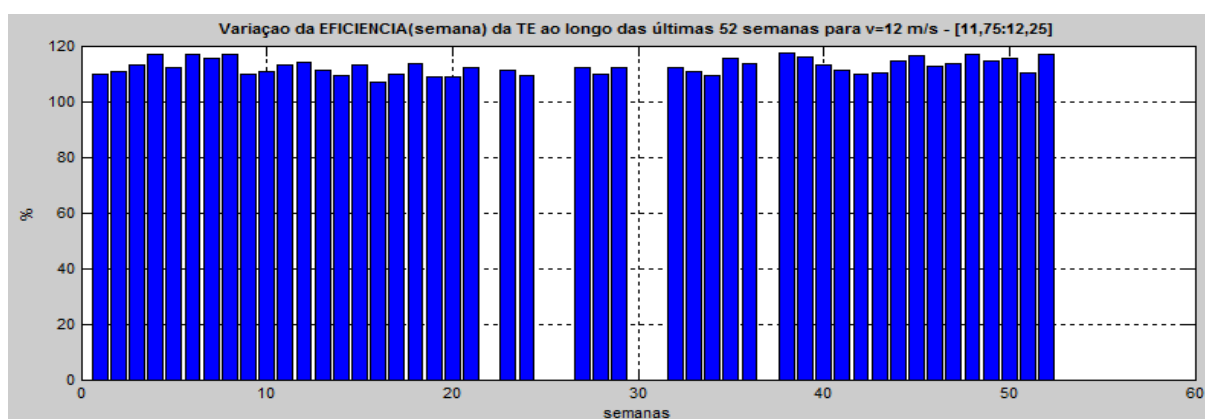


Figura 4.36 - Gráfico da variação da  $\eta_{vi( semana)}$  da TE ao longo das últimas 52 semanas, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de 12 – [11,75:12,25] m/s

As colunas inexistentes no gráfico da figura 4.36 significa que nessas semanas (22, 25, 26, 30, 31 e 37) não existiram valores válidos para calcular a eficiência semanal da TE, ou devido à avaria da TE (potência real e eficiência nula) ou devido à inexistência de vento nesse intervalo de velocidade do vento de 11,75 até 12,25 m/s. Verifica-se que a eficiência semanal da TE foi sempre superior a 100 % e inferior a 120 % e de acordo com a tabela 03 da figura 4.31 a média anual foi de 113 % com filtros e 112 % sem filtros.

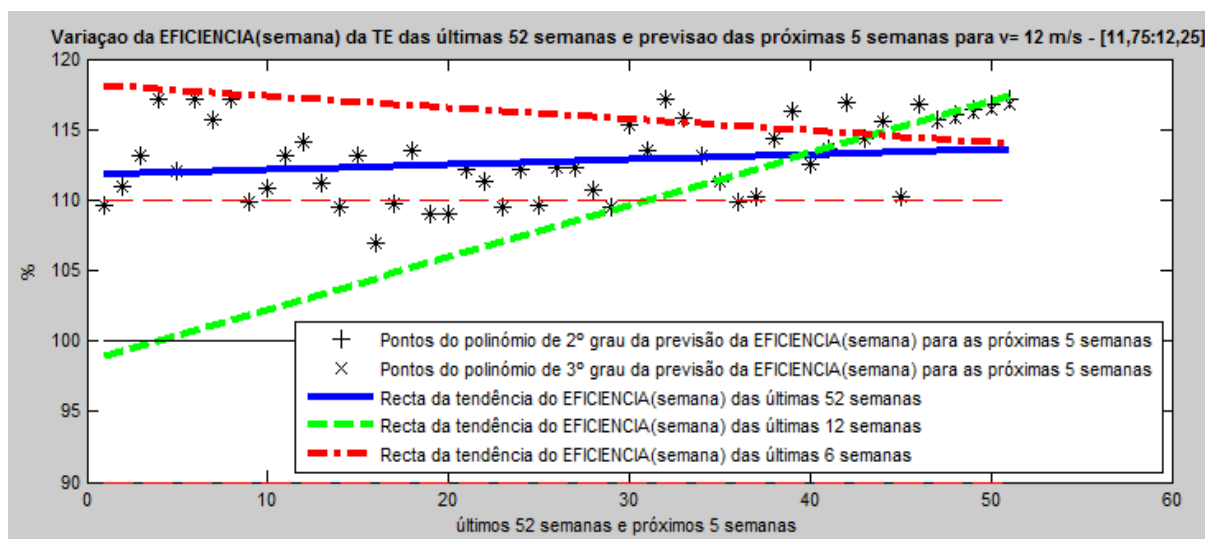


Figura 4.37 - Gráfico da variação da  $\eta_{vi( semana)}$  da TE das últimas 52 semanas e previsão das próximas 5 semanas, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de 12 – [11,75:12,25] m/s

No gráfico da figura 4.37 não estão representadas as 52 semanas, só as 46 semanas que têm valor não nulo de eficiência semanal, pois existem seis semanas que não têm registos válidos para o intervalo de velocidade do vento de 11,75 até 12,25 m/s. Observa-se também que nas próximas 5 semana é previsível que a eficiência semanal da TE seja superior a 100 % e perto dos 115 %, tudo indica que a TE vai estar a funcionar normalmente nas próximas semanas e que não existem indícios de avaria na TE.

Verifica-se que o gráfico da figura 4.37 é muito semelhante ao gráfico da figura 4.22, especialmente a inclinação das três retas das tendências da eficiência semanal da TE, por isso o sinal que dão para o futuro não é claro, pelo contrário.

A figura 4.38 é a figura principal final do programa AnaliTE\_CEP\_31dias e como se pode observar é parecida com a figura principal do programa AnaliTE\_CEP\_52semanas figura 4.27. Os gráficos e tabelas do programa AnaliTE\_CEP\_31dias (por exemplo o gráfico das figuras 4.39) também são semelhantes aos do programa AnaliTE\_CEP\_52semanas (por exemplo no gráfico da figura 4.36).

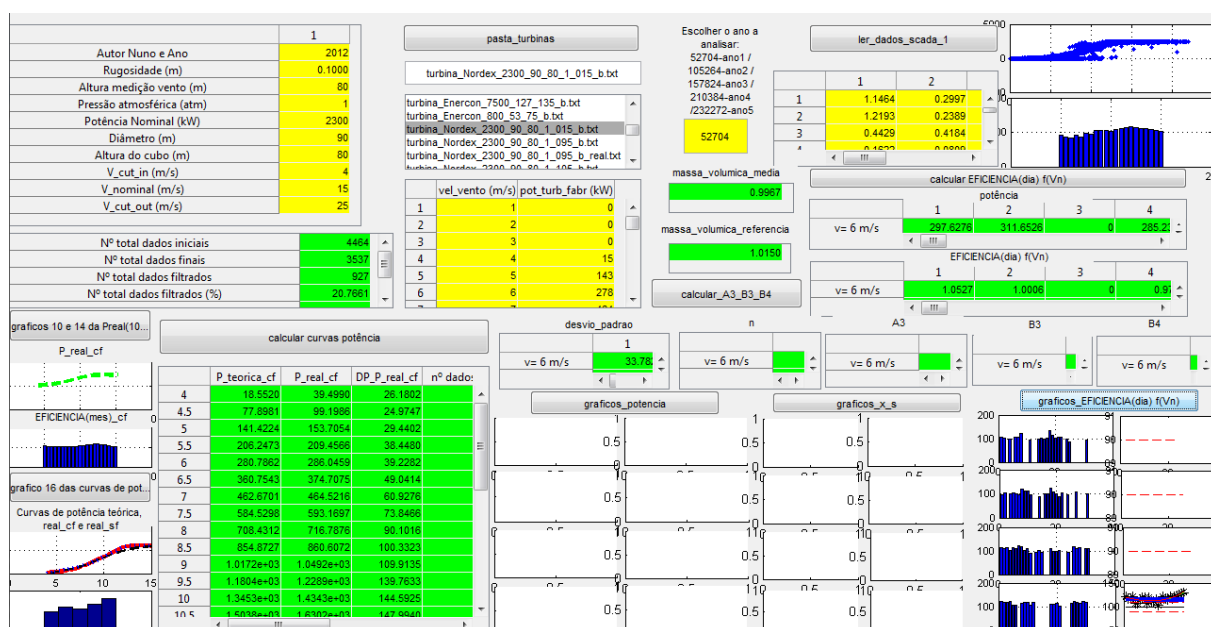


Figura 4.38 - Figura principal final do programa AnaliTE\_CEP\_31dias

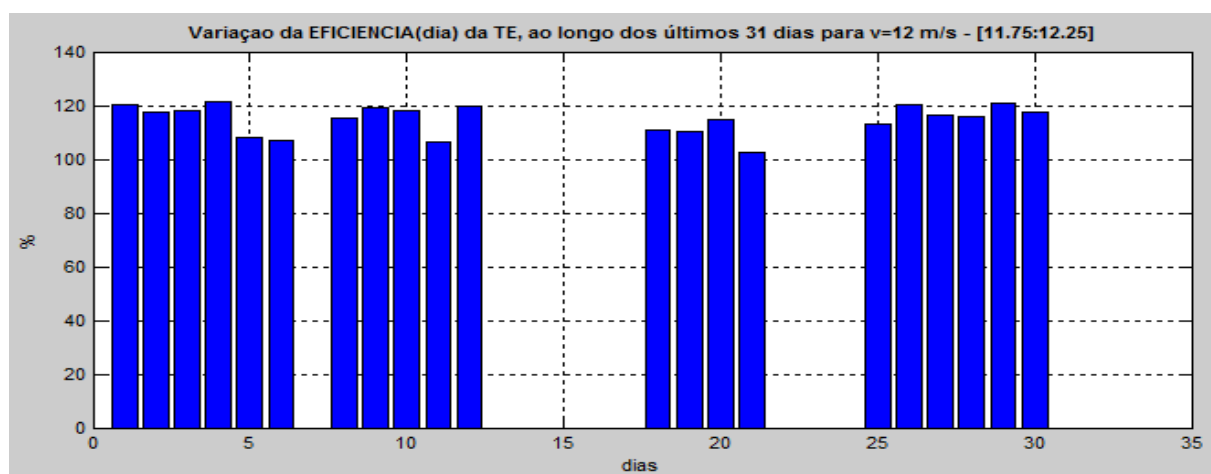


Figura 4.39 - Gráfico da variação da  $\eta_{Vi(dia)}$  da TE ao longo dos últimos 31 dias, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de 12 – [11,75:12,25] m/s

As colunas inexistentes no gráfico da figura 4.39 significa que nesses dias (6, 13, 14, 15, 16, 17, 22, 23, 24 e 31) não existiram valores válidos para calcular a eficiência diária da TE, ou devido à avaria da TE (potência real e eficiência nula) ou devido à inexistência de vento nesse intervalo de velocidade do vento de 11,75 até 12,25 m/s. Observa-se que a eficiência diária da TE foi sempre superior a 100 % e inferior a 125 %.

No gráfico da figura 4.40 observa-se que nos próximos 5 dias é previsível que a eficiência diária da TE esteja perto dos 115 %, tudo indica que vai estar a funcionar normalmente e não existem indícios de avaria.

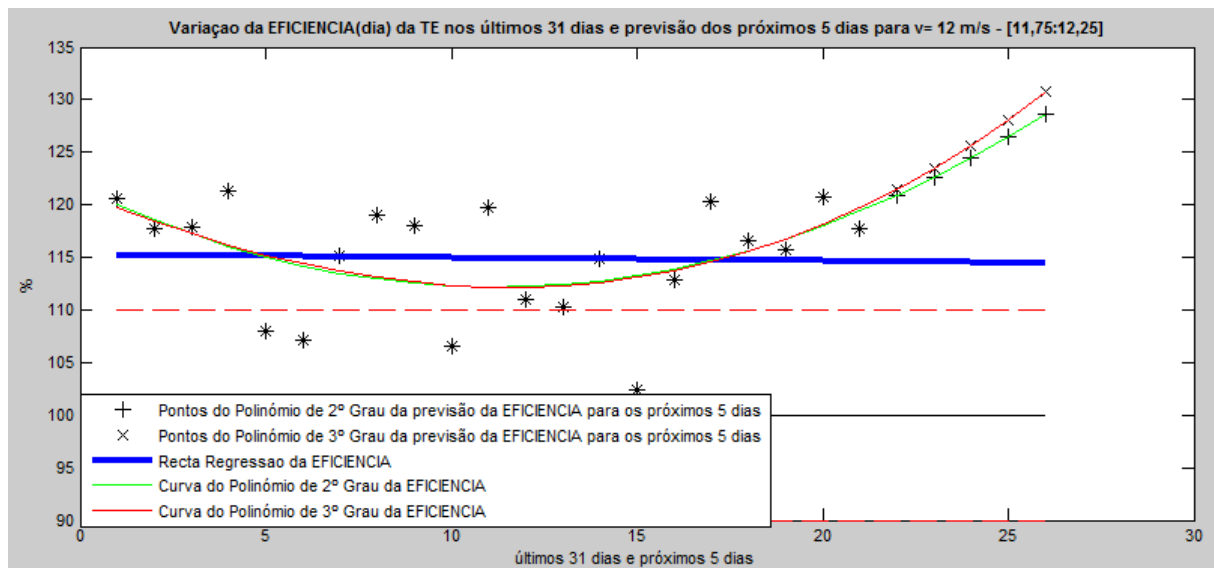


Figura 4.40 - Gráfico da variação da  $\eta_{vi(\text{dia})}$  da TE nos últimos 31 dias e previsão dos próximos 5 dias, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de 12 – [11,75;12,25] m/s

Pode-se observar que os gráficos das figuras 4.39 e 4.40 estão em concordância com as últimas semanas dos gráficos das figuras 4.36 e 4.37 e com a eficiência anual da TE (sem filtros) para a velocidade do vento de 12 m/s da figura 4.20 – 112 %.

## Capítulo 5 – Análise de dados reais de TE

No presente capítulo é feita a análise de dois parques eólicos (PEs), o PE1 com cinco TE e o PE2 com oito TE. As treze TE analisadas são todas da marca NORDEX, modelo N90 diâmetro do rotor 90 m e potência nominal de 2.300 kW. A análise consiste no uso dos diversos programas, que aplicam as respectivas metodologias para diagnosticar o funcionamento das 13 TE no passado, analisar as tendências e prever o estado de desempenho e eficiência para os próximos dias e/ou semanas, na tentativa de prever avarias graves.

### 5.1. Aplicação da metodologia 1 aos dois PEs

Na metodologia 1 calcula-se a MV média e a MV de referência para os dois locais, dos dois PEs, para o período em que existem dados *SCADA*, de 01/01/2008 até 31/05/2012. E determinam-se as curvas de potência de referência do fabricante para as respectivas massas volúmicas de referência. Para isso usa-se o programa *Calcular\_M\_Vol\_Ref\_Curva\_Pot\_Ref*.

Os resultados obtidos do PE1 estão resumidos na tabela 5.1 e do PE2 na tabela 5.2.

Tabela 5.1 – Tabela da  $\rho_{(media)}$  e  $\rho_{(ref)}$  de cada TE do PE1 para o período de 01/01/2008 até 31/05/2012

	$\rho_{(media)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{(ref)}$ (kg/m <sup>3</sup> )
TE1	1,1002	1,105
TE2	1,0998	1,095
TE3	1,1167	1,115
TE4	1,0976	1,095
TE5	1,0982	1,095

Tabela 5.2 – Tabela da  $\rho_{(media)}$  e  $\rho_{(ref)}$  de cada TE do PE2 para o período de 01/01/2008 até 31/05/2012

	$\rho_{(media)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{(ref)}$ (kg/m <sup>3</sup> )
TE1	0,9809	1,015
TE2	0,9803	1,015
TE3	0,9806	1,015
TE4	0,9814	1,015
TE5	0,9802	1,015
TE6	0,9802	1,015
TE7	0,9802	1,015
TE8	0,9803	1,015

Observa-se nas tabelas 5.1 e 5.2 que a  $\rho_{(media)}$  do PE1 é  $\pm 12$  % superior à do PE2 e que no PE1 existe uma variação de  $\pm 2$  % entre a TE3 e a TE4, o que pode indicar que algum equipamento de medição não está a funcionar corretamente ou está descalibrado.

A curva de potência de referência proposta pelo fabricante para as condições atmosféricas analisadas de todas as TE do PE2, é a curva *spline* a traço contínuo preto da figura 2.3 que corresponde aos dados do ficheiro do anexo M. Enquanto a curva de potência de referência proposta pelo fabricante para as condições atmosféricas analisadas da TE3 do PE1, é a curva *spline* a traço contínuo preto da figura 5.1 que coincide a 100 % com os pontos da curva de potência de referência do fabricante.

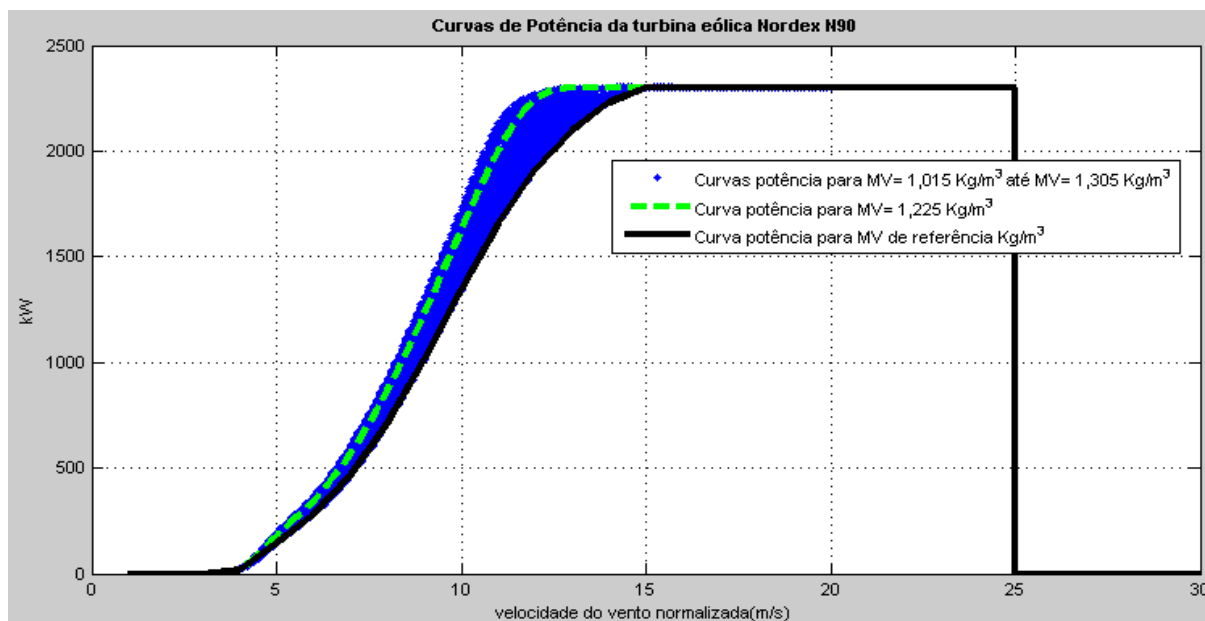


Figura 5.1 - Gráfico das curvas de potência da TE Nordex N90 para diferentes MV do ar

## 5.2. Aplicação da metodologia 2 aos dois PEs

Na metodologia 2 faz-se uma análise anual dos anos 2008, 2009, 2010 e 2011, para as treze TE. Usa-se a zona 2 do programa AnalITE2. Os resultados obtidos são apresentados no anexo N.

As três tabelas seguintes 5.3 e 5.4 apresentam um resumo dos parâmetros de saída anuais das TEs por PE e dos dois PEs, para se fazer uma análise comparativa anual do funcionamento das TEs e dos PEs nos últimos quatro anos (2008-2011).

Tabela 5.3 – Tabela resumo dos parâmetros de saída anuais dos dois PEs

	2PE_13TE	Soma_4anos_2PE
	Média/(ano.TE)	Soma_4anos_13TE
<b>EV<sub>n(ano)</sub></b> normalizada (MWh/ano)	<b>20.449</b>	<b>1.063.370</b>
<b>Er<sub>(ano)</sub></b> (MWh/ano)	<b>5.344</b>	<b>277.880</b>
<b>Et<sub>(ano)</sub></b> normalizada (MWh/ano)	<b>5.635</b>	<b>293.005</b>
<b>DES<sub>energia(ano)</sub></b> normalizada (MWh/ano)	<b>-291</b>	<b>-15.125</b>
<b>η<sub>(ano)</sub></b> normalizada (%)	<b>95</b>	
<b>REND<sub>(ano)</sub></b> normalizada (%)	<b>26</b>	
<b>FU<sub>(ano)</sub></b> normalizada (%)	<b>26,5</b>	
<b>DES<sub>(hora)</sub></b> normalizada (kW)	<b>-33,2</b>	

Na tabela 5.3 pode ver-se que as treze TE nos quatro anos produziram 278 GWh, converteram 26 % do total da energia disponível do vento de 1.063 GWh e tiveram um fator de utilização de 26,5 %.

As treze TE nos quatro anos deviam ter produzido teoricamente 293 GWh segundo as curvas de referência do fabricante para as MV de referência dos dois PE, o que se traduziu numa perda de produção real de energia em relação à energia teórica de 15 GWh.

Cada TE devia ter produzido em média por ano 5.635 MWh mas produziu 5.344 MWh, isto é -291 MWh a que corresponde um desempenho de -33 kW, ou seja, cada TE esteve a produzir



em média com -33 kW de potência real em relação à assegurada pelo fabricante, isto é produziu em média por hora -33 kWh de energia elétrica renovável. O que equivale a uma eficiência anual de 95 %.

Tabela 5.4 – Tabela resumo dos parâmetros de saída anuais das cinco TE do PE1 e das oito TE do PE2

	PE1			PE2		
	Média/TE	Média/PE1	Soma_4anos	Média/TE	Média/PE2	Soma_4anos
		Soma_5TE	PE1_5TE		Soma_8TE	PE2_8TE
<b>V<sub>(ano)</sub></b> - (m/s)	6,6			6,9		
<b>Vn<sub>(ano)</sub></b> (m/s)	6,6			6,8		
Temperatura média anual (°C)	12,1			11,5		
Pressão média anual (mbar)	899,3			797,6		
<b>ρ<sub>(ano)</sub></b> (kg/m <sup>3</sup> )	1,099			0,976		
<b>EVn<sub>(ano)</sub></b> normalizada (MWh/ano)	19.030	95.152	380.607	21.336	170.691	682.763
<b>Er<sub>(ano)</sub></b> (MWh/ano)	5.116	25.580	102.319	5.486	43.890	175.561
<b>Et<sub>(ano)</sub></b> normalizada (MWh/ano)	5.778	28.889	115.555	5.545	44.362	177.450
<b>DES<sub>energia(ano)</sub></b> normalizada (MWh/ano)	-662	-3.309	-13237	-59	-472	-1.888
<b>η<sub>(ano)</sub></b> normalizada (%)	89			99		
<b>REND<sub>(ano)</sub></b> normalizada (%)	27			26		
<b>FU<sub>(ano)</sub></b> normalizada (horas)	2.224			2.385		
<b>FU<sub>(ano)</sub></b> normalizada (%)	25,4			27,2		
<b>PROD<sub>(ano)</sub></b> normalizada (kWh/m <sup>2</sup> )	804			862		
<b>DES<sub>(hora)</sub></b> normalizada (kW)	-75,6	-378		-6,7	-54	

Na tabela 5.4 pode ver-se que no PE1 cada TE devia ter produzido em média por ano 5.778 MWh mas produziu 5.116 MWh, isto é -662 MWh a que corresponde um desempenho de -76 kW, ou seja, cada TE esteve a produzir em média com -76 kW de potência real em relação à assegurada pelo fabricante, isto é produziu em média por hora -76 kWh de energia elétrica renovável. O que equivale a uma eficiência anual de 89 %.

Na tabela 5.4 pode ver-se também que no PE2 cada TE devia ter produzido em média por ano 5.545 MWh mas produziu 5.486 MWh, isto é -59 MWh a que corresponde um desempenho de -7 kW, ou seja, cada TE esteve a produzir em média com -7 kW de potência real em relação à assegurada pelo fabricante, isto é produziu em média por hora -7 kWh de energia elétrica renovável. O que equivale a uma eficiência anual de 99 %.

O PE2 teve um funcionamento melhor que o PE1, isto é com menos paragens e avarias, só assim se explica a diferença de eficiência e de desempenho dos dois PEs.

A tabela 5.5 tem como objetivo comparar as várias TE do mesmo PE, neste caso comparar as oito TES do PE2.

Observa-se que a TE2 foi a que teve o pior desempenho (-40 kW) abaixo da média do PE2 (-7 kW) e pior eficiência (94 %) e a TE1 foi a que teve melhor desempenho (34 kW) e melhor eficiência (105 %) acima da média do PE2 (99 %).

A TE1 foi a que produziu mais energia (5.987 MWh) e a TE5 foi a que produziu menos energia (4.934 MWh) abaixo da média do PE2 (5.486 MWh).

A TE1 foi a que teve um funcionamento melhor no PE2, isto é com menos paragens e avarias, só assim se explica a diferença de eficiência e de desempenho das oito TES.

A TE que melhor aproveita a energia do vento é a TE6, que tem um rendimento de 30 %, apesar de ser uma das duas TEs que menos energia elétrica produziu, cerca de 5.098 MWh em média nos quatro anos.

A TE2 tem um fator de utilização da potência nominal elevado, cerca de 29 %, apesar de ter um desempenho de -40 kW e uma eficiência de 94 %, considerados maus, o que prova que este parâmetro não está diretamente relacionado com o estado de saúde da TE, ou seja, podemos ter TEs a funcionar deficientemente com fatores de utilização elevados (caso da TE2) e podemos ter TEs a funcionar eficientemente com fatores de utilização baixos (caso da TE6).

Tabela 5.5 – Tabela resumo dos parâmetros de saída anuais por TE do PE2

	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média
	/ano	/ano	/ano	/ano	/ano	/ano	/ano	/ano
	PE2- TE1	PE2- TE2	PE2- TE3	PE2- TE4	PE2- TE5	PE2- TE6	PE2- TE7	PE2- TE8
<b>EV<sub>n(ano)</sub></b> normalizada (MWh/ano)	<b>22.014</b>	<b>27.064</b>	<b>24.331</b>	<b>22.755</b>	<b>19.279</b>	<b>17.005</b>	<b>19.022</b>	<b>19.221</b>
<b>Er<sub>(ano)</sub></b> (MWh/ano)	<b>5.987</b>	<b>5.829</b>	<b>5.871</b>	<b>5.884</b>	<b>4.934</b>	<b>5.098</b>	<b>5.177</b>	<b>5.111</b>
<b>Et<sub>(ano)</sub></b> normalizada (MWh/ano)	<b>5.689</b>	<b>6.180</b>	<b>5.975</b>	<b>5.817</b>	<b>5.181</b>	<b>4.871</b>	<b>5.330</b>	<b>5.320</b>
<b>DES<sub>energia(ano)</sub></b> normaliza(MWh/ano)	<b>298</b>	<b>-350</b>	<b>-104</b>	<b>67</b>	<b>-246</b>	<b>227</b>	<b>-154</b>	<b>-210</b>
<b>η<sub>(ano)</sub></b> normalizada (%)	<b>105</b>	<b>94</b>	<b>98</b>	<b>101</b>	<b>96</b>	<b>105</b>	<b>97</b>	<b>96</b>
<b>REND<sub>(ano)</sub></b> normalizada (%)	<b>27</b>	<b>22</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>26</b>	<b>30</b>	<b>28</b>	<b>27</b>
<b>FU<sub>(ano)</sub></b> normalizada (%)	<b>30</b>	<b>29</b>	<b>29</b>	<b>29</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>25</b>
<b>DES<sub>(hora)</sub></b> normalizada (kW)	<b>34</b>	<b>-40</b>	<b>-12</b>	<b>8</b>	<b>-28</b>	<b>26</b>	<b>-18</b>	<b>-24</b>

A tabela 5.6 tem como objetivo comparar os resultados anuais da mesma TE ao longo dos anos, neste caso analisar os valores anuais da TE1 e da TE5 (do PE2) ao longo dos quatro anos.

Tabela 5.6 – Tabela resumo dos parâmetros de saída anuais, por ano, das TE1 e TE5 do PE2

	PE2- TE1	PE2- TE1	PE2- TE1	PE2- TE1	PE2- TE5	PE2- TE5	PE2- TE5	PE2- TE5
	2008	2009	2010	2011	2008	2009	2010	2011
<b>V<sub>(ano)</sub></b> - (m/s)	6,5	7,1	7,3	6,7	6,6	7,0	6,8	6,2
<b>Vn<sub>(ano)</sub></b> (m/s)	6,4	7,1	7,3	6,6	6,5	7,0	6,8	6,2
Temperatura média anual (°C)	10,6	11,5	11,1	12,2	10,8	11,5	11,5	12,4
Pressão média anual (mbar)	796,6	798,1	799,7	797,0	796,5	798,2	799,6	797,0
<b>ρ<sub>(ano)</sub></b> (kg/m <sup>3</sup> )	0,978	0,977	0,981	0,973	0,977	0,977	0,980	0,973
<b>EV<sub>n(ano)</sub></b> normalizada (MWh/ano)	<b>18.793</b>	<b>22.534</b>	<b>26.089</b>	<b>20.639</b>	<b>16.189</b>	<b>22.577</b>	<b>21.493</b>	<b>16.858</b>
<b>Er<sub>(ano)</sub></b> (MWh/ano)	<b>5.877</b>	<b>6.300</b>	<b>6.310</b>	<b>5.462</b>	<b>5.055</b>	<b>4.561</b>	<b>5.288</b>	<b>4.834</b>
<b>Et<sub>(ano)</sub></b> normalizada (MWh/ano)	<b>5.333</b>	<b>5.965</b>	<b>6.208</b>	<b>5.252</b>	<b>5.030</b>	<b>5.608</b>	<b>5.471</b>	<b>4.613</b>
<b>DES<sub>energia(ano)</sub></b> normaliza(MWh/ano)	<b>544</b>	<b>335</b>	<b>102</b>	<b>210</b>	<b>25</b>	<b>-1.047</b>	<b>-183</b>	<b>220</b>
<b>η<sub>(ano)</sub></b> normalizada (%)	<b>110</b>	<b>106</b>	<b>102</b>	<b>104</b>	<b>100</b>	<b>81</b>	<b>97</b>	<b>105</b>
<b>REND<sub>(ano)</sub></b> normalizada (%)	<b>31</b>	<b>28</b>	<b>24</b>	<b>26</b>	<b>31</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>29</b>
<b>FU<sub>(ano)</sub></b> normalizada (horas)	<b>29,2</b>	<b>31,3</b>	<b>31,3</b>	<b>27,1</b>	<b>25,1</b>	<b>22,6</b>	<b>26,2</b>	<b>24,0</b>
<b>DES<sub>(hora)</sub></b> normalizada (kW)	<b>62,2</b>	<b>38,3</b>	<b>11,6</b>	<b>24,0</b>	<b>2,8</b>	<b>-119,5</b>	<b>-20,9</b>	<b>25,2</b>

Na tabela 5.6 pode verificar-se que a TE1 teve um desempenho excelente em 2008 (62,2 kW) e a TE5 teve um desempenho desastroso em 2009 (-119,5 kW).

A TE1 teve um fator de utilização máximo anual de 31,3 % em 2009 e 2010, enquanto a TE5 teve um fator de utilização mínimo anual de 22,6 % em 2009.

A TE1 e a TE2 tiveram em 2009 energias disponíveis no vento semelhantes ( $\pm 22.550$  MWh) mas a TE1 produziu mais 1.739 MWh de energia renovável do que a TE5, daí os 106 % de EFICIÊNCIA da TE1 muito mais elevado que os 81 % da TE5.

A tabela 5.7 tem como objetivo comparar os resultados mensais da mesma TE ao longo dum ano, neste caso analisar os valores mensais da TE5 em 2009, quando teve um desempenho e uma eficiência tão medíocres.

Tabela 5.7 – Tabela resumo dos parâmetros de saída mensais da TE5 do PE2 do ano 2009

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>Vn<sub>(mes)</sub></b> (m/s)	10,2	6,6	6,3	6,3	6,2	5,6	5,2	4,5	4,8	7,8	9,5	10,4
<b><math>\rho_{(mes)}</math></b> (kg/m <sup>3</sup> )	1,008	0,999	0,981	0,992	0,972	0,963	0,964	0,932	0,957	0,97	0,993	0,999
<b>EVn<sub>(mes)</sub></b> (MWh/mês)	<b>5.646</b>	<b>1.745</b>	<b>1.291</b>	<b>882</b>	<b>912</b>	<b>967</b>	<b>742</b>	<b>362</b>	<b>420</b>	<b>1.920</b>	<b>3.046</b>	<b>4.648</b>
<b>Er<sub>(mes)</sub></b> (MWh/mês)	<b>170</b>	<b>79</b>	<b>379</b>	<b>356</b>	<b>350</b>	<b>316</b>	<b>224</b>	<b>130</b>	<b>158</b>	<b>643</b>	<b>847</b>	<b>910</b>
<b>Et<sub>(mes)</sub> normalizada</b> (MWh/mês)	<b>825</b>	<b>447</b>	<b>394</b>	<b>347</b>	<b>356</b>	<b>315</b>	<b>237</b>	<b>141</b>	<b>161</b>	<b>643</b>	<b>822</b>	<b>921</b>
<b>DES<sub>energia(mes)</sub> norma</b> (MWh/mês)	<b>-655</b>	<b>-368</b>	<b>-15</b>	<b>9</b>	<b>-6</b>	<b>1</b>	<b>-13</b>	<b>-11</b>	<b>-3</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>-11</b>
<b><math>\eta_{(mes)}</math> normalizada</b> (%)	<b>21</b>	<b>18</b>	<b>96</b>	<b>103</b>	<b>98</b>	<b>100</b>	<b>95</b>	<b>92</b>	<b>98</b>	<b>100</b>	<b>103</b>	<b>99</b>
<b>REND<sub>(mes)</sub></b> normalizada (%)	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>29</b>	<b>40</b>	<b>38</b>	<b>33</b>	<b>30</b>	<b>36</b>	<b>38</b>	<b>33</b>	<b>28</b>	<b>20</b>
<b>FU<sub>(mes)</sub> normalizada</b> (%)	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>20</b>	<b>19</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>38</b>	<b>51</b>	<b>53</b>

Na tabela 5.7 pode ver-se que a TE5 teve fatores de utilização máximos de 53 % em dezembro e 51 % em novembro, enquanto teve fatores de utilização mínimos de 5 % em fevereiro, 8 % em agosto e 10 % em janeiro e setembro.

Observa-se também que em setembro o fator de utilização foi de 10 % e a eficiência mensal foi de 98 % devido por um lado ao bom desempenho da TE5 em setembro (-3 MWh) e por outro lado à pouca energia disponível do vento (420 MWh), 11 vezes menos que em dezembro (4.648 MWh).

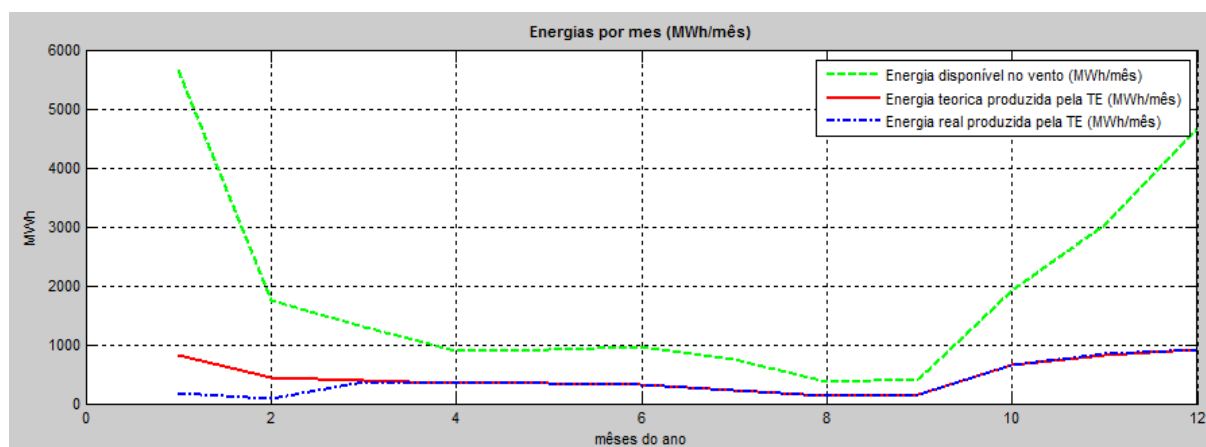


Figura 5.2 - Gráfico das **EVn<sub>(mes)</sub>**, **Er<sub>(mes)</sub>** e **Et<sub>(mes)</sub>** da TE5 do PE2 no ano de 2009

Na figura 5.2 observa-se que a variação da energia teórica produzida pela TE5 acompanha a variação da energia disponível no vento ao longo do ano de 2009, mas a variação da energia

real produzida não acompanha a variação da energia disponível no vento e a variação da energia teórica produzida nos primeiros dois meses do ano.

Verifica-se na figura 5.2 que a TE5 teve no mês de janeiro 5.646 MWh de energia disponível no vento e só converteu em energia elétrica 170 MWh, muito menos que os 825 MWh que deveria ter produzido se tivesse funcionado normalmente.

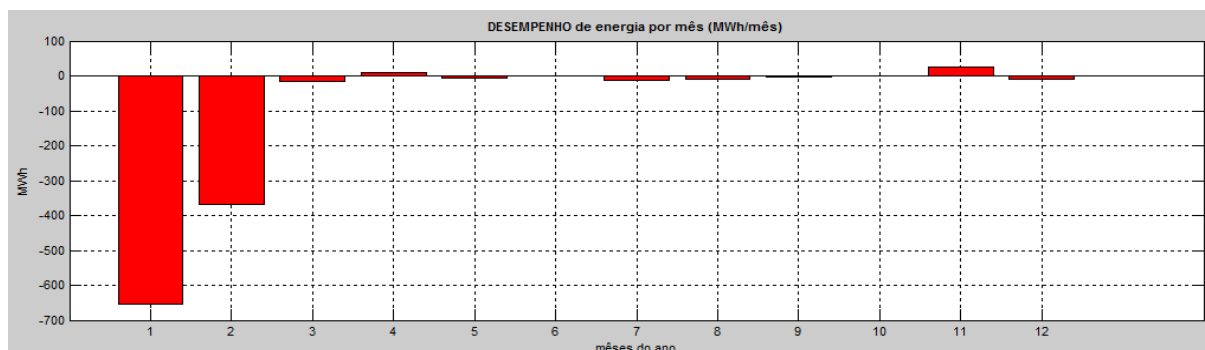


Figura 5.3 - Gráfico do  $DES_{energia(mes)}$  da TE5 do PE2 no ano de 2009

Observa-se na figura 5.3 a TE5 do PE2 teve um  $DES_{(mes)}$  excelente em novembro (25 MWh) e dois meses desastroso de janeiro e fevereiro (-655 MWh e -368 MWh).

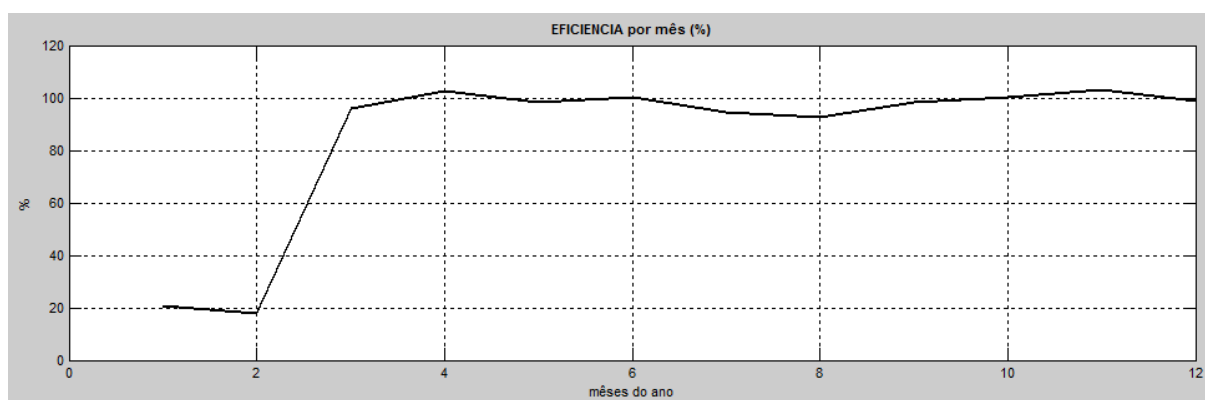


Figura 5.4 - Gráfico da  $\eta_{(mes)}$  da TE5 do PE2 no ano de 2009

Verifica-se na figura 5.4 que a TE5 teve eficiências mensais desastrosas em janeiro e fevereiro (21 % e 18 %) e nos restantes meses à volta dos 100 %, de funcionamento normal.

Tabela 5.8 – Tabela resumo dos parâmetros de saída por direção da TE5 do PE2 do ano 2009

	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
$Vn_{dir(ano)}$ (m/s)	5,7	5,0	5,5	6,8	5,1	6,8	8,9	10,5	8,3	6,4	6,5	6,2
$\rho_{dir(ano)}$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,964	0,968	0,978	0,973	0,969	0,976	0,981	0,983	0,983	0,985	0,988	0,981
$Ev_{n_{dir(ano)}}$ (MWh/direcao)	1.406	407	578	1.434	393	1.071	2.201	6.834	4.017	1.387	1.582	1.268
$Er_{dir(ano)}$ (MWh/direcao)	510	140	184	480	148	88	376	1.091	600	248	311	385
$Et_{dir(ano)}$ (MWh/direcao)	555	153	191	512	141	154	509	1.360	768	315	483	468
$DES_{energia_{dir(ano)}}$ (MWh/direcao)	-44	-13	-7	-32	7	-66	-133	-269	-168	-67	-171	-83
$\eta_{dir(ano)}$ (%)	92	92	96	94	105	57	74	80	78	79	64	82
$REND_{dir(ano)}$ (%)	36	34	32	33	38	8	17	16	15	18	20	30
$FU_{dir(ano)}$ (%)	17	10	18	27	14	14	33	44	28	18	16	17

A tabela 5.8 e o gráfico da figura 5.5 têm como objetivo analisar os parâmetros anuais em função da direção do vento da TE5 em 2009 quando teve um desempenho e uma eficiência tão medíocres.

Na tabela 5.8 pode observar-se que dos 4.561 MWh de energia produzida pela TE5 em 2009, 1.091 MWh foram produzidas para a direção do vento de 240°.

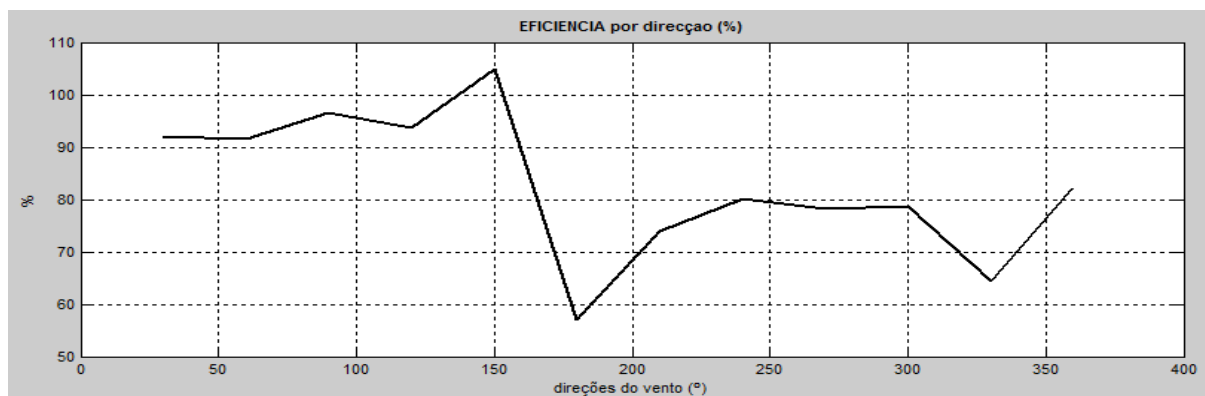


Figura 5.5 - Gráfico da  $\eta_{dir(ano)}$  da TE5 do PE2 no ano de 2009

Observa-se na tabela 5.8 e na figura 5.5 que a TE5 em 2009 teve eficiência por direção entre os 57 % para a direção do vento de 180° e os 105 % para a direção do vento de 150°, à volta dos 81 % da eficiência anual para o ano de 2009, não existindo nenhuma direção do vento que chame a atenção.

Os gráficos das figuras 5.6, 5.7 e 5.8 têm como objetivo analisar os parâmetros anuais da TE5 em 2009 em função da velocidade do vento.

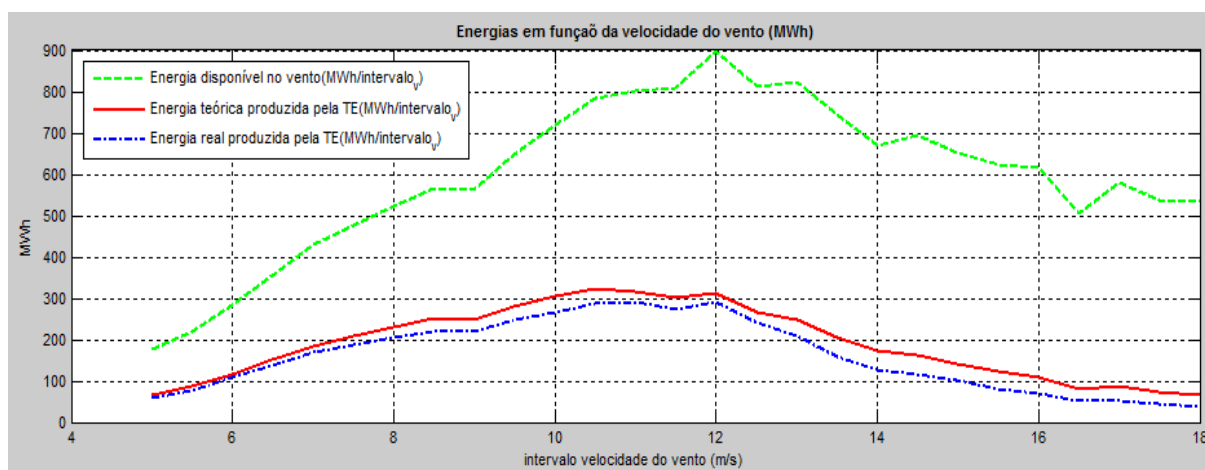


Figura 5.6 - Gráfico das  $EV_{Vi(ano)}$ ,  $Er_{Vi(ano)}$  e  $Et_{Vi(ano)}$  da TE5 do PE2 no ano de 2009

Observa-se na figura 5.6 que a TE5 em 2009 produziu a maior parte da energia elétrica para as velocidades do vento entre 6 e 15 m/s.

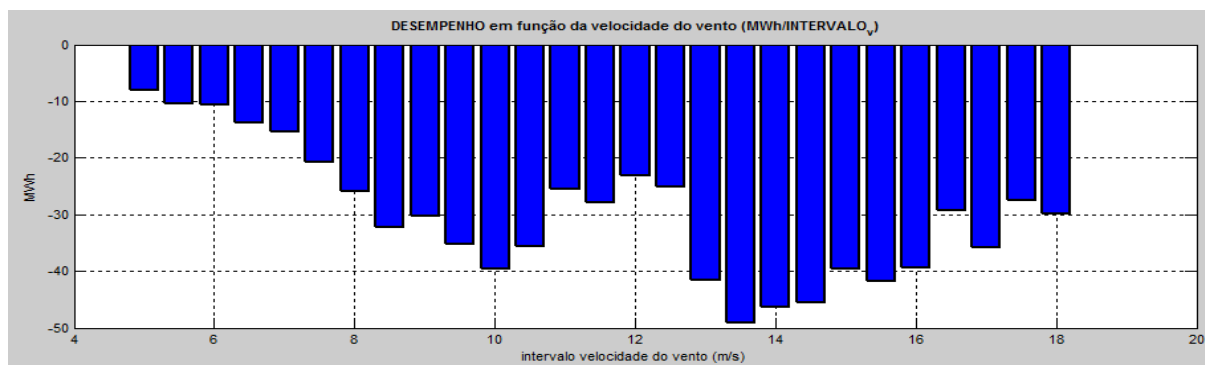


Figura 5.7 - Gráfico do  $DES_{energia_{vi(ano)}}$  da TE5 do PE2 no ano de 2009

Observa-se na figura 5.7 que a TE5 em 2009 teve um desempenho negativo para as velocidades do vento entre 5 e 18 m/s e o pior desempenho foi para as velocidades do vento entre 13,25 e 13,75 m/s (-49 MWh).

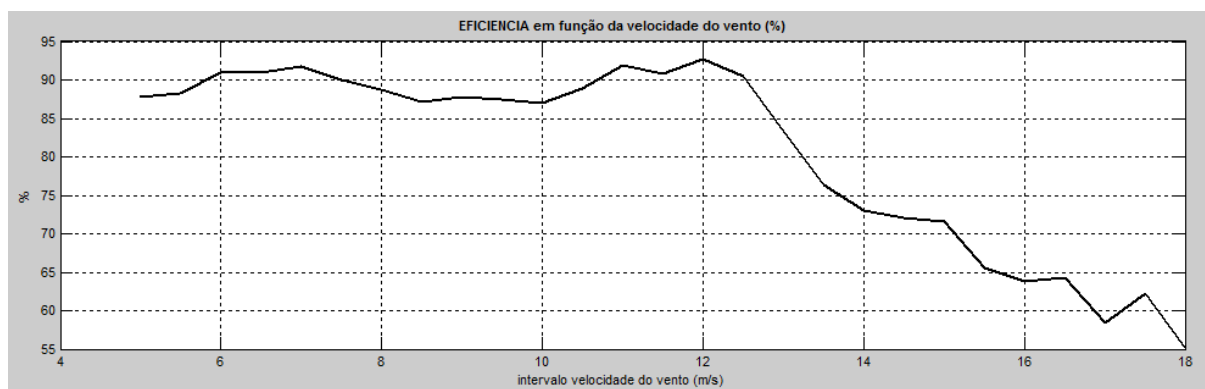


Figura 5.8 - Gráfico da  $\eta_{vi(ano)}$  da TE5 do PE2 no ano de 2009

Observa-se na figura 5.8 que a TE5 em 2009 teve uma eficiência de  $\pm 90\%$  para as velocidades do vento até 12 m/s e depois desce para 55 % para a velocidade do vento de 18 m/s, por isso pode concluir-se que a TE5 em 2009 teve uma perda de eficiência para velocidades do vento superiores a 12 m/s.

### 5.3. Aplicação das metodologias 3 e 4

Usa-se a zona 2 e 3 do programa AnaliTE2.

Antes de se fazer a aplicação das metodologias 3 e 4 fez-se a análise das principais intervenções nas TEs do PE2.

As intervenções efetuadas nas TEs foram subdivididas, em ações de inspeção (visuais, aos lubrificantes, de segurança e bom funcionamento, endoscópica da caixa multiplicadora, vibrações), em ações de manutenção preventiva (revisões, mudanças de óleos e filtros), em ações de melhoria e em ações de manutenção corretiva (reparações).

Das 325 intervenções efetuadas e registadas às oito TEs do PE2 (anexo P) mais de 50 % foram de manutenção preventiva como se pode ver na tabela 5.9

As principais ações de manutenção de melhoria foram a instalação de oito sistemas de monitorização de condições (CMS) e a substituição dos travões dos motores de *Yaw* por melhores nas oito TE.

Tabela 5.9 – Tabela das intervenções efetuadas e registadas no PE2 de 01/2008 a 05/2012

Inspeções	55	17%
Manutenção preventiva	173	53%
Manutenção melhoria	24	7%
Manutenção corretiva	73	22%
Total de intervenções PE2	325	100%

As principais ações de inspeção foram as inspeções endoscópicas às caixas multiplicadoras, as inspeções das tensões/deformações das pás e dos veios secundário de alta rotação e as análises aos óleos das caixas multiplicadoras.

As principais ações de manutenção preventiva foram as manutenções do tipo II (semianuais), do tipo III (anuais), as ações de verificar/alinhar gerador e as ações de substituição de óleo, filtro e anel de vedação das caixas multiplicadoras.

As principais ações de manutenção corretiva efetuadas e registadas no PE2, de 1 de janeiro de 2008 a 31 de maio de 2012, estão listadas na tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Tabela das principais intervenções corretivas efetuadas no PE2 de 01/2008 a 05/2012

substituição da caixa multiplicadora	3
substituição de <i>incoders</i> e inversores do sistema Pitch	25
reparação das pás	13
substituição do rolamento de suporte do veio de alta rotação	4
substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora	2
substituição da bomba do sistema de refrigeração	1
substituição do rolamento do gerador	1
substituição da caixa redutora do sistema Yaw	1
substituição da placa do programa de controlo (LPC)	6
substituição do motor do sistema Yaw	1

Outras ações de manutenção corretiva observadas foram, por exemplo, a substituição de anemómetros e de sensores.

Em relação à substituição da caixa multiplicadora fez-se a análise na TE1, na TE2 e na TE5 aplicando as metodologias 3, 4, 5 e 6 para os períodos anteriores às respetivas intervenções.

A primeira análise foi à TE5 que sofreu uma ação de manutenção corretiva para substituir a caixa multiplicadora, de 14/01/2009 a 20/02/2009, esteve 37 dias parada em reparação sem produzir energia elétrica, por isso esta reparação pode ser considerada como uma grande intervenção na TE e a avaria como grave e de elevados custos. Foi por este motivo que a TE5 teve o desempenho e a eficiência tão baixos em janeiro e fevereiro de 2009 como mostram os gráficos das figuras 5.3 e 5.4.

Nas figuras 5.9 e 5.10 são apresentados os principais gráficos das análises efetuadas aos dados do *SCADA* da TE5 das 52 semanas anteriores à substituição da caixa multiplicadora.



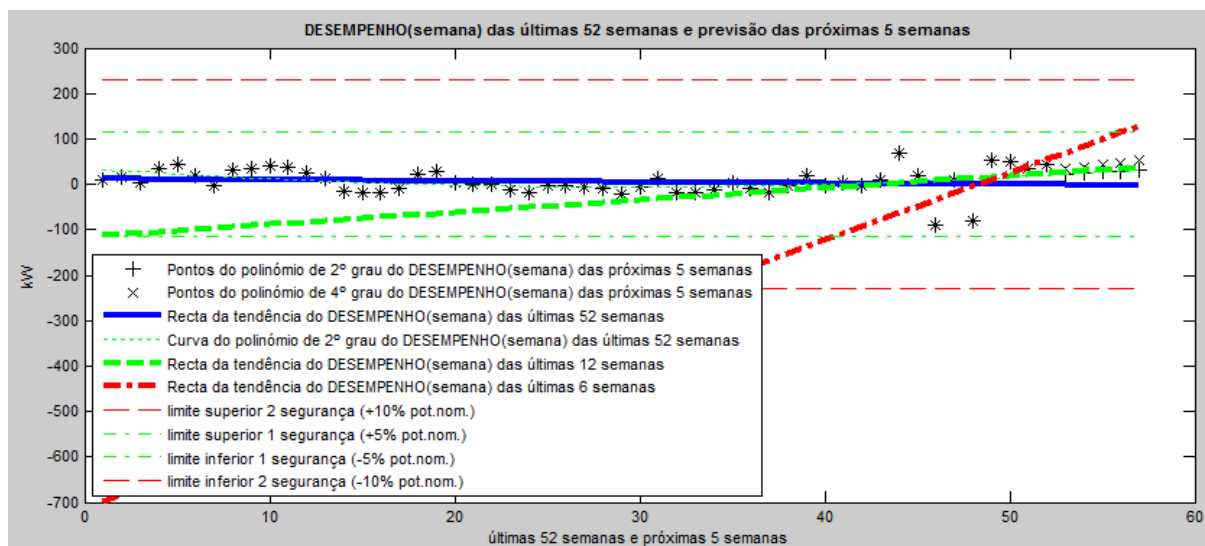


Figura 5.9 – Gráfico da variação do  $DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da avaria na caixa multiplicadora na TE5

Na figura 5.9 pode observar-se que a média do desempenho semanal, ao longo das últimas 52 semanas, esteve sempre dentro dos limites de segurança dos  $\pm 5\%$  da potência nominal ( $\pm 115$  kW).

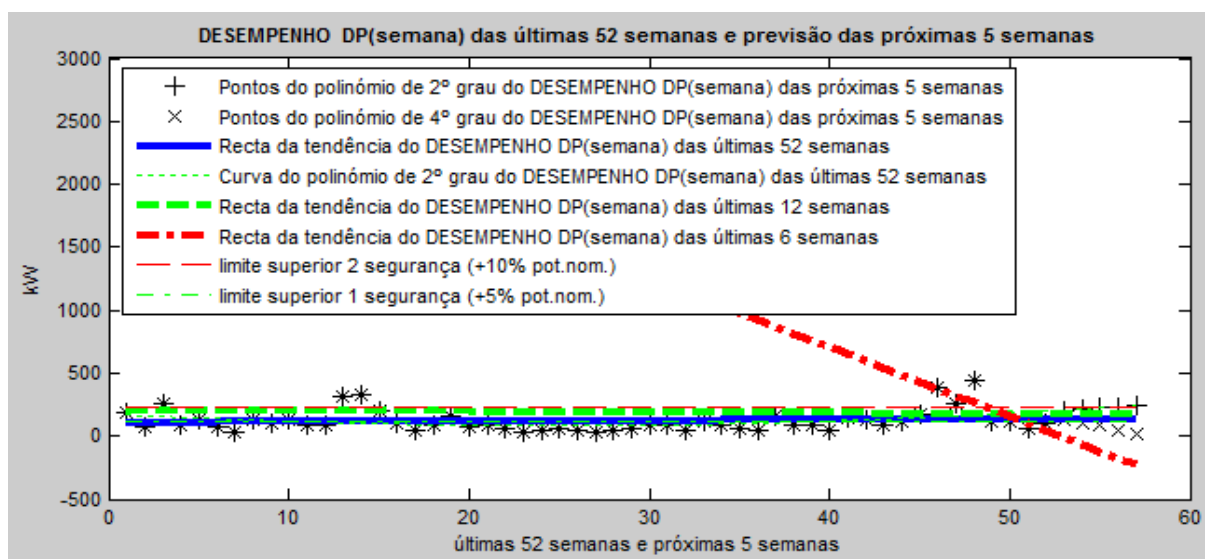


Figura 5.10 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da avaria na caixa multiplicadora na TE5

Na figura 5.10 pode observar-se que o desvio padrão do  $DES_{(semana)}$  saiu fora do limite superior 2 de segurança (+10 % potência nominal) em algumas semanas.

As inclinações das retas das tendências ou retas das regressões das médias e dos desvios padrão do  $DES_{(semana)}$  das últimas 52, 12 e 6 semanas da TE5, estão listadas na tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Tabela das inclinações das retas de tendência das médias e dos DP do desempenho semanal da TE5

	Média (kW)	DP (kW)
reta das últimas 52 semanas	-0,2	0,5
reta das últimas 12 semanas	2,7	-0,7
reta das últimas 6 semanas	14,8	-55,1



Os valores das médias e dos desvios padrão do desempenho semanal da última semana Y (52) e a previsão para daqui a 5 semanas Y (57), de acordo com as retas de regressão das últimas 52, 12 e 6 semanas, da TE5, estão listadas na tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Tabela das médias e dos DP do desempenho semanal da TE5 na última semana Y (52) e previsão para daqui a 5 semanas Y (57)

	Média (kW)	DP (kW)
Y (52)	43,4	99,3
Y (57) da reta das últimas 52 semanas	-2,1	135,6
Y (57) da reta das últimas 12 semanas	38,0	170,2
Y (57) da reta das últimas 6 semanas	128,8	0

Da análise das inclinações das retas da tendência das médias e dos desvios padrão do desempenho semanal das últimas 52, 12 e 6 semanas pode afirmar-se que a previsão para as próximas semanas é de bom funcionamento da TE5, isto é, um aumento da média do desempenho semanal e uma diminuição do desvios padrão do desempenho semanal, ou seja, não existem vestígios da aproximação de avarias, pelo contrário nas últimas 6 semanas a média do desempenho semanal melhorou em 14,8 kW por semana e está previsto que daqui a 5 semanas a TE5 apresente uma média do desempenho semanal de 128,8 kW (analisando só os valores das últimas 6 semanas).

As inclinações das retas das tendências ou retas das regressões das médias e dos desvios padrão do desempenho diário dos últimos 31 e 12 dias da TE5 estão listadas na tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Tabela das inclinações das retas de tendência das médias e dos DP do desempenho diário da TE5

	Média (kW)	DP (kW)
reta dos últimos 31 dias	-0,2	-1,5
reta dos últimos 12 dias	1,7	5,6

Os valores das médias e dos desvios padrão do desempenho diário do último dia Y (31) e a previsão para daqui a 7 dias Y (38), de acordo com as retas de regressão dos últimos 31 e 12 dias, da TE5, estão listadas na tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Tabela das médias e dos DP do desempenho diário da TE5 no último dia Y (31) e previsão para daqui a 7 dias Y (38)

	Média (kW)	DP (kW)
Y (31)	34,1	97,4
Y (38) da reta dos últimos 31 dias	39,9	56,2
Y (38) da reta dos últimos 12 dias	57,1	142,3

Nas figuras 5.11 e 5.12 são apresentados os principais gráficos das análises efetuadas aos dados do SCADA da TE5 nos últimos 31 dias anteriores à avaria grave.

Pode observar-se na figura 5.11 e na tabela 5.13 que a reta da tendência da média do desempenho diário dos últimos 31 dias tem inclinação ligeiramente negativa (-0,2 kW), o que significa que a TE diminuiu ligeiramente o desempenho diário nos últimos 31 dias e tende a diminuir nos próximos dias, mas a reta da tendência da média do desempenho diário dos últimos 12 dias tem inclinação positiva (1,7 kW), o que significa que a TE aumentou o desempenho diário nos últimos 12 dias e tende a aumentar nos próximos dias se nada de anormal acontecer.

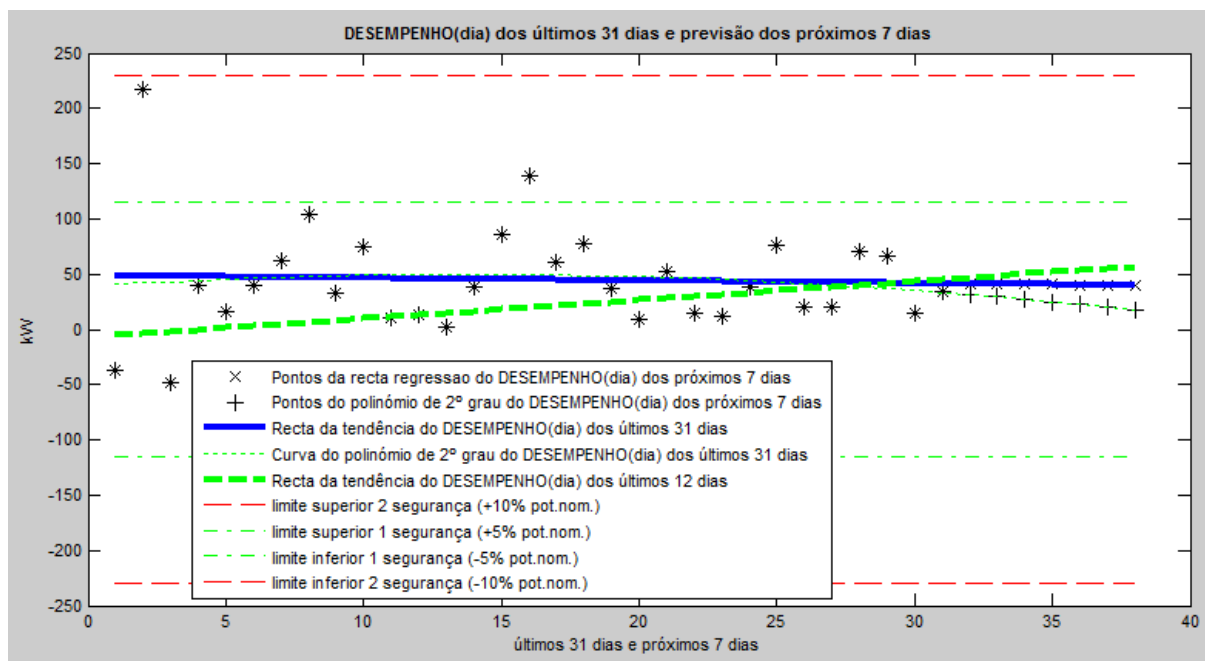


Figura 5.11 – Gráfico da variação do  $DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da avaria na caixa multiplicadora na TE5

Na tabela 5.14 e na figura 5.11 verifica-se que o valor da média do desempenho diário do último dia, Y (31) é 34,1 kW, é previsto que a TE5 tenha daqui a 7 dias, Y (38) uma média do desempenho diário de 39,9 kW de acordo com a reta da regressão dos últimos 31 dias e de 57,1 kW de acordo com a reta da regressão dos últimos 12 dias, por isso pode afirmar-se que a previsão para os próximos dias é de bom funcionamento e não existem indícios da aproximação de avarias.

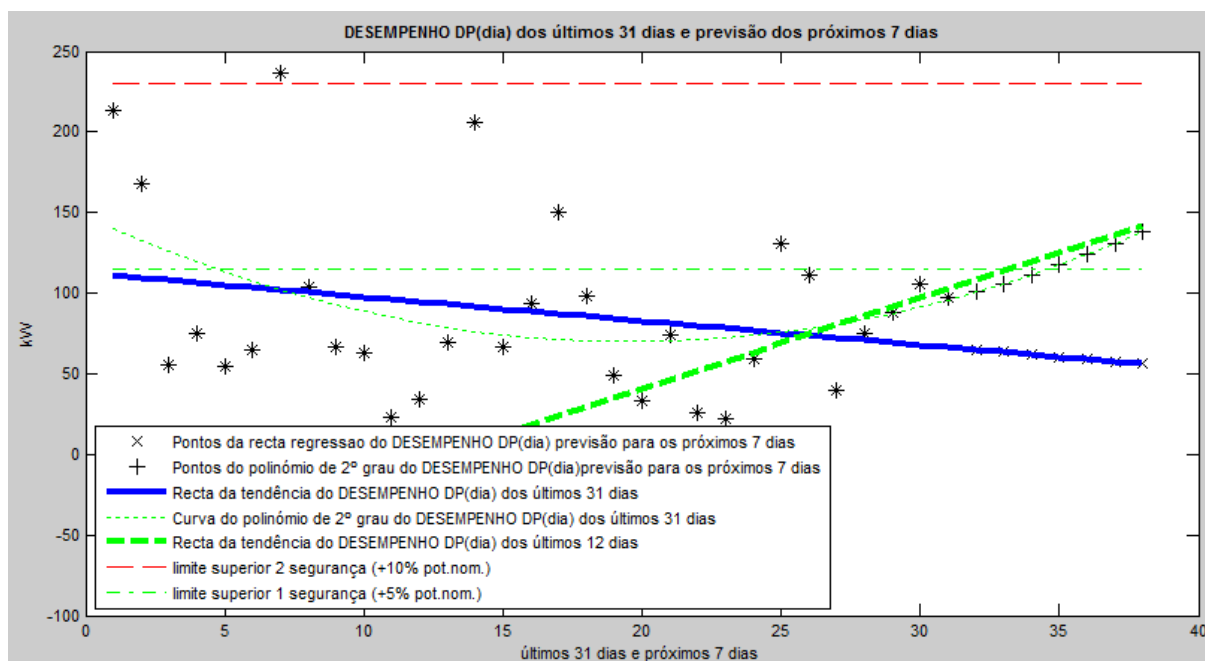


Figura 5.12 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da avaria na caixa multiplicadora na TE5

Pode observar-se na figura 5.12 e nas tabelas 5.13 e 5.14 que, por um lado, a reta da tendência do desvio padrão do desempenho diário tem inclinação negativa (-1,5 kW), o que significa que a TE diminuiu o desvio padrão do desempenho diário nos últimos 31 dias e tende a

diminuir nos próximos dias o que é bom, pois tende a sinalizar que o processo de produção está mais controlado, mais normalizado e com menos variações de funcionamento. Por outro lado, nos últimos 12 dias o desvio padrão do desempenho diário aumentou em 5,6 kW por dia, o que dá um sinal negativo para o futuro funcionamento da TE. Portanto a variação do desvio padrão do desempenho diário está a dar sinais contraditórios, o que impossibilita retirar conclusões para as previsões futuras.

A segunda análise foi à TE1 que esteve parada de 09/08/2010 a 14/08/2010 devido à substituição da caixa multiplicadora e a terceira análise foi à TE2 que teve uma ação de manutenção corretiva para substituir a caixa multiplicadora de 05/02/2009 até 20/02/2009.

Os principais resultados obtidos para as três TE foram resumidos na tabela 5.15 seguinte:

Tabela 5.15 – Tabela dos valores e das inclinações das retas de tendência das médias e dos desvios padrão do desempenho por semana e por dia da TE5, TE1 e TE2

		TE5 (kW)	TE1 (kW)	TE2 (kW)
média	Inclinação da reta das últimas 52 semanas	-0,2	-0,3	1,1
	Inclinação da reta das últimas 12 semanas	2,7	-0,6	0,8
	Inclinação da reta das últimas 6 semanas	14,8	1,3	-9,2
DP	Inclinação da reta das últimas 52 semanas	0,5	-1,7	-1,3
	Inclinação da reta das últimas 12 semanas	-0,7	-5,6	-2,9
	Inclinação da reta das últimas 6 semanas	-55,1	6,7	-20,6
média	Y (52)	43,4	11,9	40,7
	Y (57) reta das últimas 52 semanas	-2,1	32,0	40,4
	Y (57) reta das últimas 12 semanas	38,0	5,0	55,6
	Y (57) reta das últimas 6 semanas	128,8	16,8	-18,6
DP	Y (52)	99,3	41,2	104,6
	Y (57) reta das últimas 52 semanas	135,3	110,5	93,7
	Y (57) reta das últimas 12 semanas	170,2	15,4	113,6
	Y (57) reta das últimas 6 semanas	0	104,5	0
média	Inclinação da reta dos últimos 31 dias	-0,2	0,3	0,4
	Inclinação da reta dos últimos 12 dias	1,7	1,9	8,8
DP	Inclinação da reta dos últimos 31 dias	-1,5	-0,3	-1,3
	Inclinação da reta dos últimos 12 dias	5,6	0,8	5,4
média	Y (31)	34,1	7,6	162,0
	Y (38) reta dos últimos 31 dias	39,9	15,1	48,9
	Y (38) reta dos últimos 12 dias	57,1	28,6	135,2
DP	Y (31)	97,4	28,0	124,6
	Y (38) reta dos últimos 31 dias	56,2	41,0	50,6
	Y (38) reta dos últimos 12 dias	142,3	42,9	132,7

Pode-se observar na tabela 5.15 que o sinal dado pela inclinação das retas das médias do desempenho por semana é positivo cinco vezes e negativo quatro vezes, ou seja é negativo cerca de 44 % das vezes.

O sinal dado pela inclinação das retas das médias do desempenho por dia é positivo cinco vezes e negativo uma vez, ou seja é negativo cerca de 17 % das vezes.

O sinal dado pela inclinação das retas dos desvios padrão do desempenho por semana é positivo duas vezes e negativo sete vezes, ou seja é positivo cerca de 22 % das vezes.

O sinal dado pela inclinação das retas dos desvios padrão do desempenho por dia é positivo três vezes e negativo três vezes, ou seja é positivo cerca de 50 % das vezes.

O sinal dado pelo valor da média do desempenho da última semana e do valor previsto para daqui a 5 semanas é positivo dez vezes e negativo duas vezes, ou seja é negativo cerca de 17 % das vezes.

O sinal dado pelo valor da média do desempenho do último dia e do valor previsto para daqui a 7 dias é positivo nove vezes e negativo zero vezes, ou seja é negativo cerca de 0 % das vezes.

Pode verificar-se que não é previsto que o valor futuro Y (57) da média do desempenho por semana atinja o limite inferior 1 de segurança e manutenção (-5 % da potência nominal da TE = -115 kW) nas próximas semanas e ainda menos provável que atinja o limite inferior 2 de segurança e manutenção (-10 % da potência nominal da TE = -230 kW).

#### 5.4. Aplicação das metodologias 5 e 6

São usados os programas AnalíTE\_CEP\_52semanas e o programa AnalíTE\_CEP\_31dias.

Em relação à substituição da caixa multiplicadora fez-se a análise na TE1, na TE2 e na TE5 à média da eficiência e ao desvio padrão da eficiência, ao longo das 52 semanas anteriores às respetivas intervenções e a previsão para as próximas 5 semanas, usando o programa AnalíTE\_CEP\_52semanas. E fez-se a análise na TE1, na TE2 e na TE5, à média da eficiência e ao desvio padrão da eficiência, ao longo dos 31 dias anteriores às respetivas intervenções e a previsão para os próximos 5 dias, usando o programa AnalíTE\_CEP\_31dias.

Nas figuras 5.13 a 5.16 são apresentados os principais gráficos das análises efetuadas aos dados do SCADA da TE5 das 52 semanas anteriores à substituição da caixa multiplicadora.

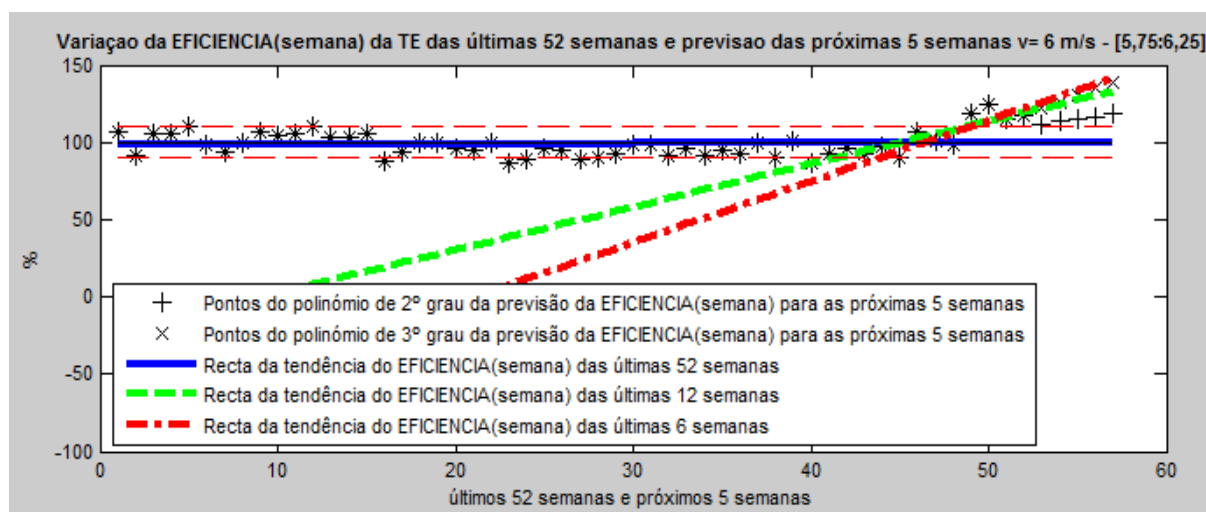


Figura 5.13 - Gráfico da variação da  $\eta_{Vi(sem)}$  da TE5, das últimas 52 semanas e previsão das próximas 5 semanas, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de [5,75;6,25] m/s

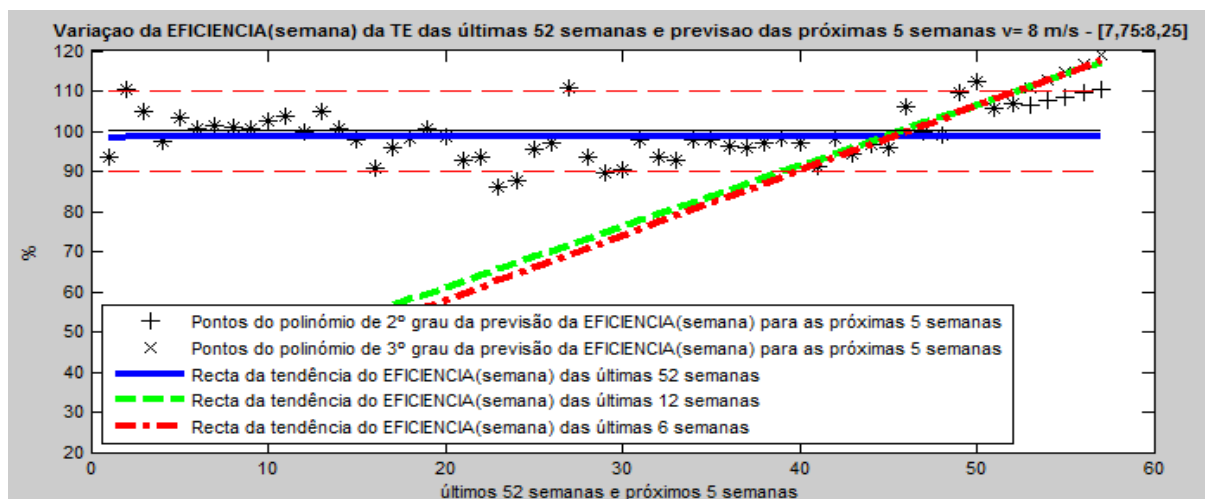


Figura 5.14 - Gráfico da variação da  $\eta_{vi(sem)}_{TE5}$  das últimas 52 semanas e previsão das próximas 5 semanas, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de [7,75:8,25] m/s

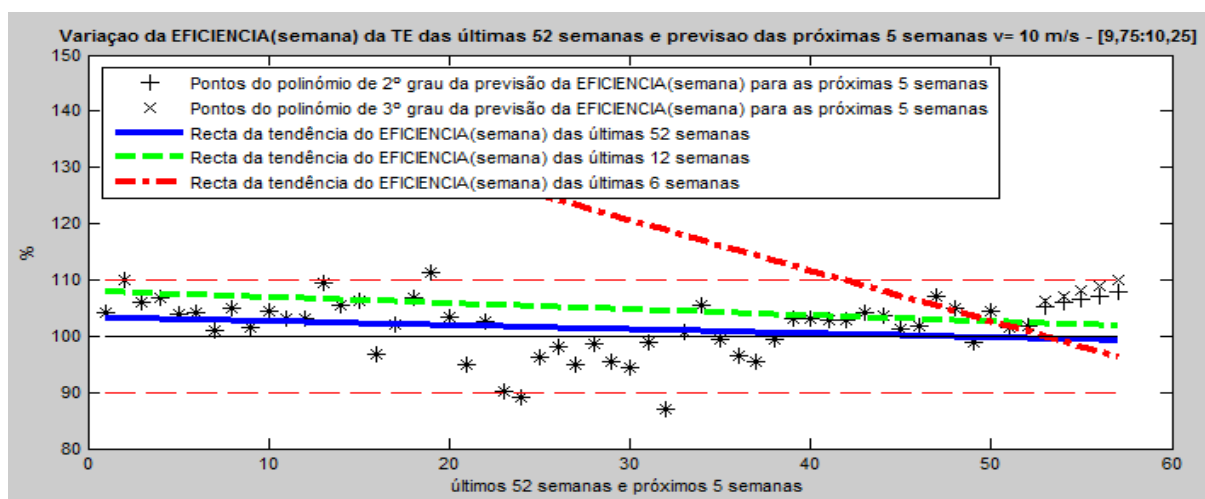


Figura 5.15 - Gráfico da variação da  $\eta_{vi(sem)}_{TE5}$  das últimas 52 semanas e previsão das próximas 5 semanas, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de [9,75:10,25] m/s

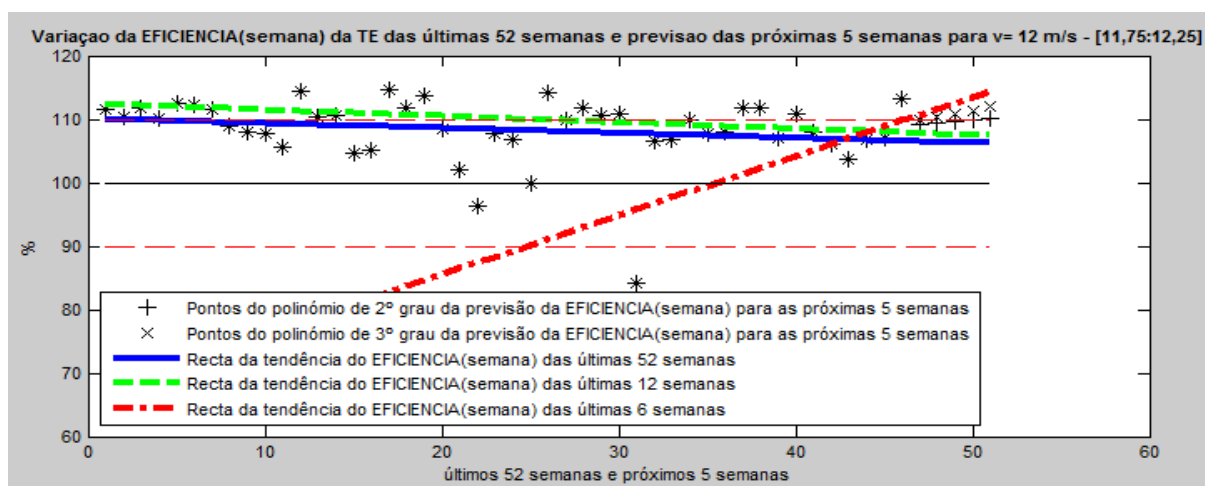


Figura 5.16 - Gráfico da variação da  $\eta_{vi(sem)}_{TE5}$  das últimas 52 semanas e previsão das próximas 5 semanas, com filtros, para o intervalo de velocidade do vento de [11,75:12,25] m/s

Observa-se nos gráficos das figuras 5.13 a 5.16 que a tendência da média semanal da eficiência é para aumentar para as velocidades do vento de 6 e 8 m/s, diminuir para  $v = 10$  m/s e

incerta para  $v = 12$  m/s. Verifica-se também que a média semanal da eficiência nas últimas semanas tem estado acima dos 100 % e muitas vezes acima dos 110 % para as velocidades do vento de 6, 8, 10 e 12 m/s.

Não é previsível que o valor da média da eficiência por semana atinja o limite inferior 2 de segurança e manutenção de 90 % para as velocidades do vento de 6, 8, 10 e 12 m/s.

Os principais resultados obtidos para as três TE, pela aplicação das metodologias 5 e 6 foram resumidos na tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Tabela dos valores e das inclinações das retas de tendência das médias da eficiência por semana e por dia da TE5, TE1 e TE2

	TE5				TE1				TE2			
	V=6 m/s	V=8 m/s	V=10 m/s	V=12 m/s	V=6 m/s	V=8 m/s	V=10 m/s	V=12 m/s	V=6 m/s	V=8 m/s	V=10 m/s	V=12 m/s
Inclinação da reta das últimas 52 semanas (%)	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,0	0,0	0,1	-0,0	0,0	0,0	0,0	-0,0
Inclinação da reta das últimas 12 semanas (%)	2,8	1,5	-0,1	-0,1	-0,6	-0,7	-1,2	-1,0	0,0	-0,3	-0,5	-0,4
Inclinação da reta das últimas 6 semanas (%)	4,0	1,6	-0,9	0,9	0,3	-0,6	-1,6	-2,2	-0,2	-0,6	-0,3	-1,0
Y (52) (%)	117,6	106,7	101,7	113,3	95,9	102,1	101,4	104,9	97,6	95,6	103,4	110,8
Y (57) da reta das últimas 52 semanas (%)	99,8	98,6	99,2	106,2	102,3	102,4	106,8	111,1	90,3	95,0	101,8	108,6
Y (57) da reta das últimas 12 semanas (%)	133,2	117,2	101,8	107,4	92,9	91,3	90,7	99,5	93,4	93,8	98,4	106,2
Y (57) da reta das últimas 6 semanas (%)	142,0	117,7	96,4	114,4	99,5	92,2	90,4	91,2	90,0	90,4	99,5	102,5
Inclinação da reta dos últimos 31 dias (%)	0,1	0,2	-0,0	0,7	-0,3	0,3	1,0	0,5	0,5	0,3	0,4	0,2
Y (31) (%)	116,7	109,7	99,8	115,1	90,6	109,1	103,8	105,4	89,2	99,4	109,2	118,0
Y (36) da reta dos últimos 31 dias (%)	118,0	108,4	102,1	117,3	92,0	97,4	108,0	109,3	101,0	99,3	104,2	111,1

Pode-se observar na tabela 5.16 que o sinal dado pela inclinação das retas das médias da eficiência por semana é positivo catorze vezes e negativo doze vezes, ou seja é negativo cerca de 39 % das vezes.

O sinal dado pela inclinação das retas das médias da eficiência por dia é positivo dez vezes e negativo duas vezes, ou seja é negativo cerca de 17 % das vezes.

O valor da média da eficiência da última semana e do valor previsto para daqui a 5 semanas é maior que 100 % vinte e cinco vezes e menor que 100 % vinte e três vezes, ou seja é menor que 100 % cerca de 48% das vezes. É menor que 95 % onze vezes cerca de 23 % e é menor que 90 % zero vezes cerca de 0%.

O sinal dado pelo valor da média da eficiência do último dia e do valor previsto para daqui a 5 dias é maior que 100% dezassete vezes e menor que 100 % sete vezes, ou seja é menor que 100 % cerca de 29 % das vezes. É menor que 95 % três vezes cerca de 12 % e é menor que 90 % uma vez cerca de 8 %.

Em relação à substituição de *incoders* e inversores do sistema *Pitch* fez-se uma análise na TE3, aplicando as metodologias 3 e 4, para o período anteriores à intervenção em 22/09/2009.

Nas figuras 5.17 e 5.18 são apresentados os principais gráficos das análises efetuadas aos dados do *SCADA* da TE3 das últimas 52 semanas e nas figuras 5.19 e 5.20 dos últimos 31 dias anteriores à substituição do inversor do sistema *Pitch* 2.

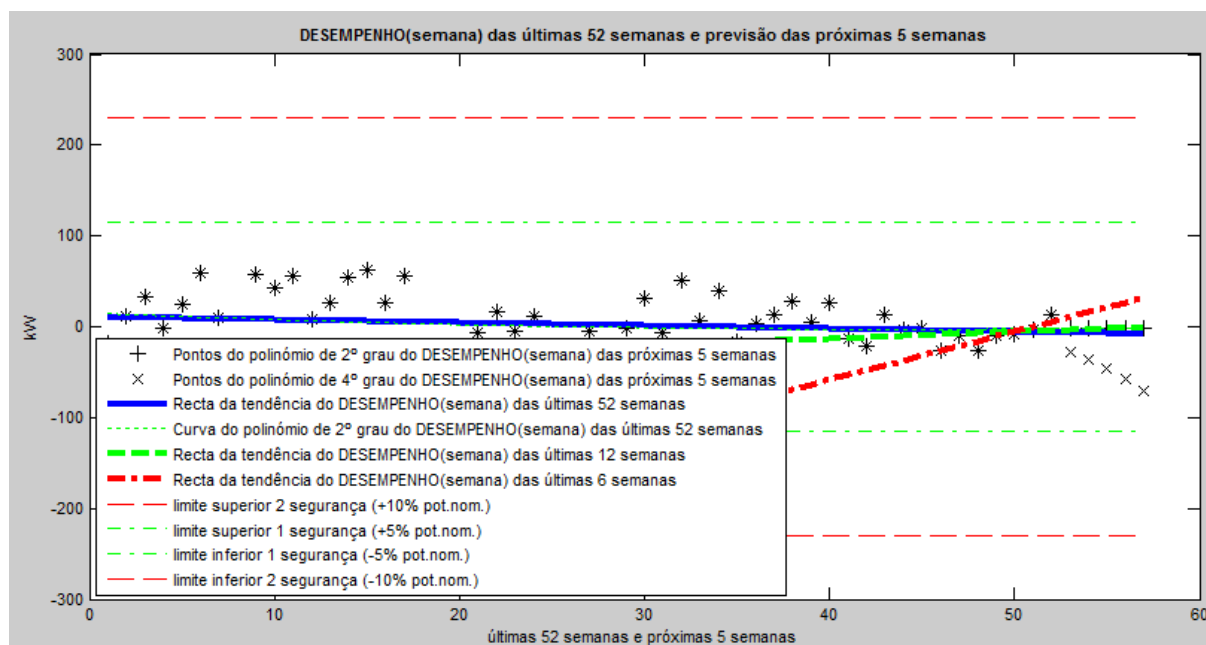


Figura 5.17 – Gráfico da variação da  $DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição do inversor do sistema *Pitch* 2 na TE3

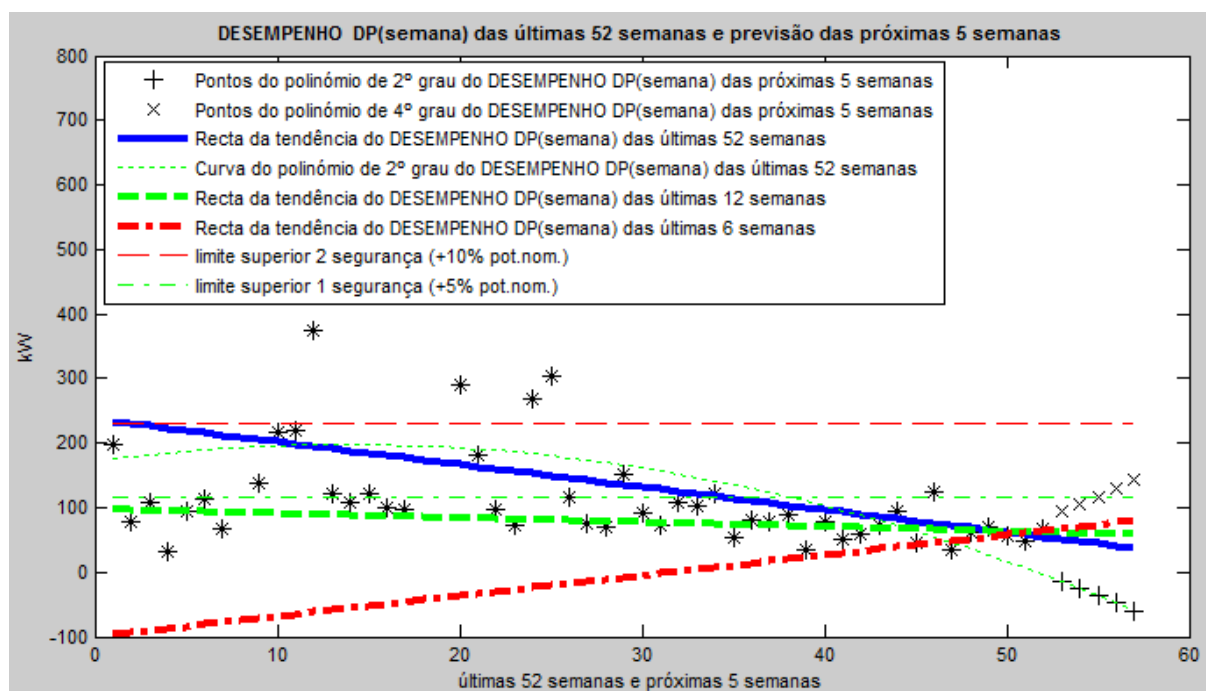


Figura 5.18 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição do inversor do sistema *Pitch* 2 na TE3



Observa-se nas figuras 5.17 e 5.19 o sinal dado pelas retas das tendências das médias do desempenho é positivo, o que indica melhoria de funcionamento para o futuro.

Verifica-se nas figuras 5.18 e 5.20 o sinal dado pelas retas das tendências dos desvios padrão do desempenho é quase sempre negativo, o que indica melhoria de funcionamento da TE3 para o futuro.

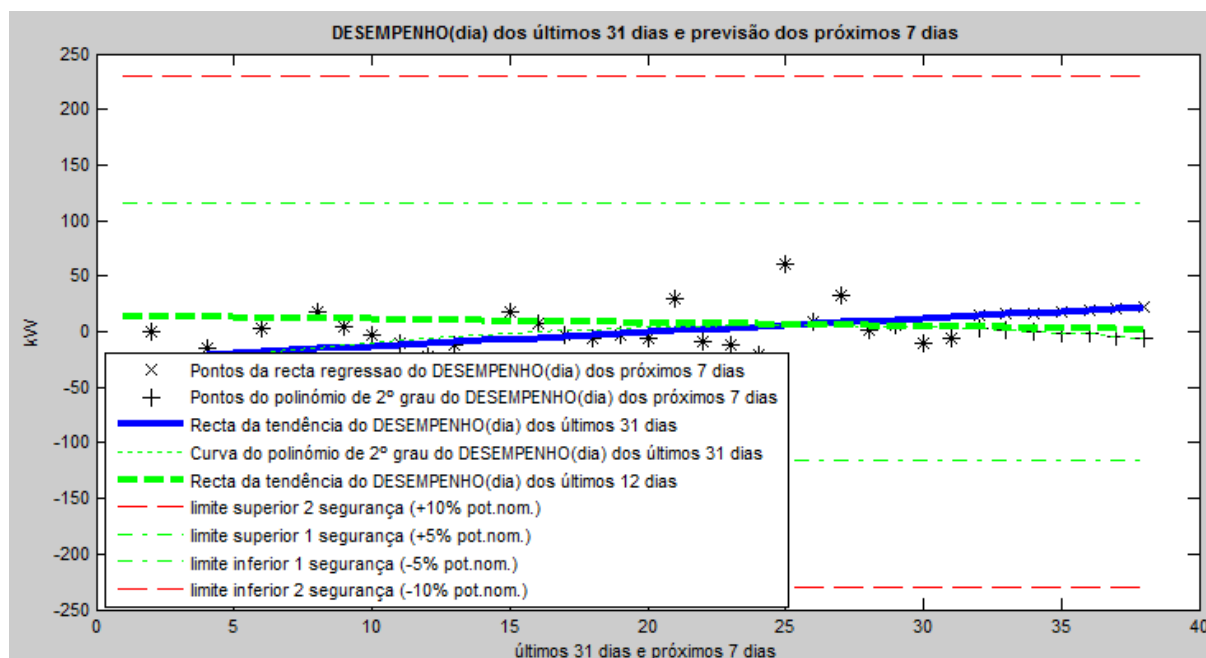


Figura 5.19 – Gráfico da variação do  $DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição do inversor do sistema *Pitch 2* na TE3

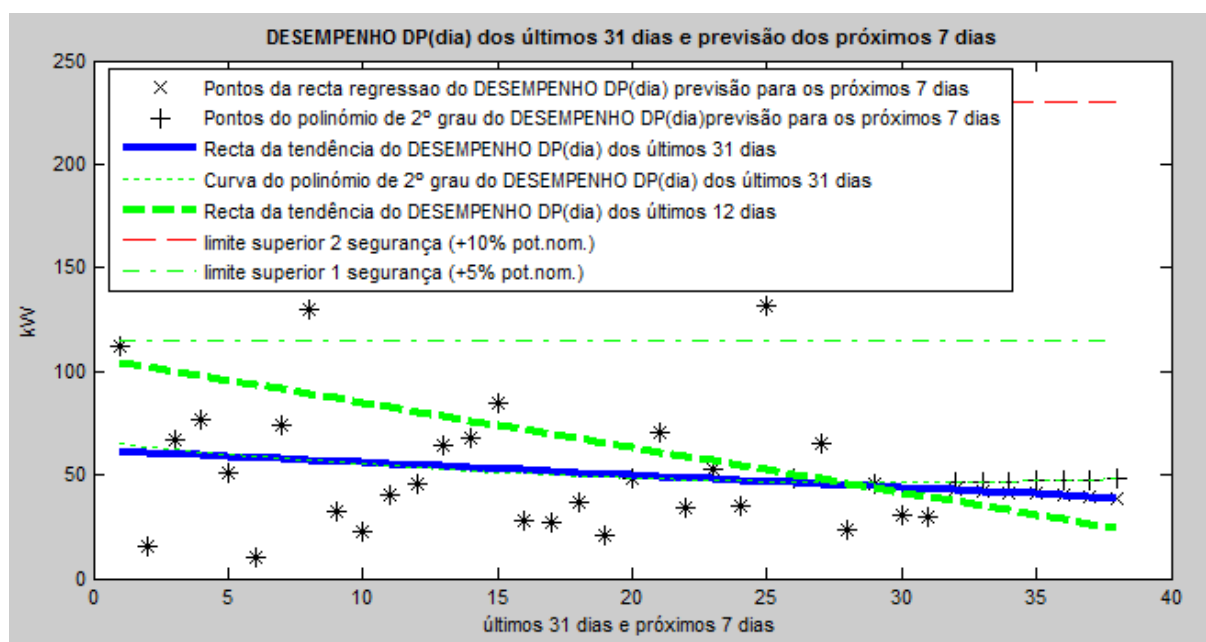


Figura 5.20 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição do inversor do sistema *Pitch 2* na TE3



Em relação à reparação das pás fez-se uma análise na TE7, aplicando as metodologias 3 e 4, para o período anterior à intervenção em 19/08/2011.

Nas figuras 5.21 e 5.22 são apresentados os principais gráficos da aplicação da metodologia 3 às 52 semanas anteriores e nas figuras 5.23 e 5.24 da aplicação da metodologia 4 aos 31 dias anteriores à reparação das pás.

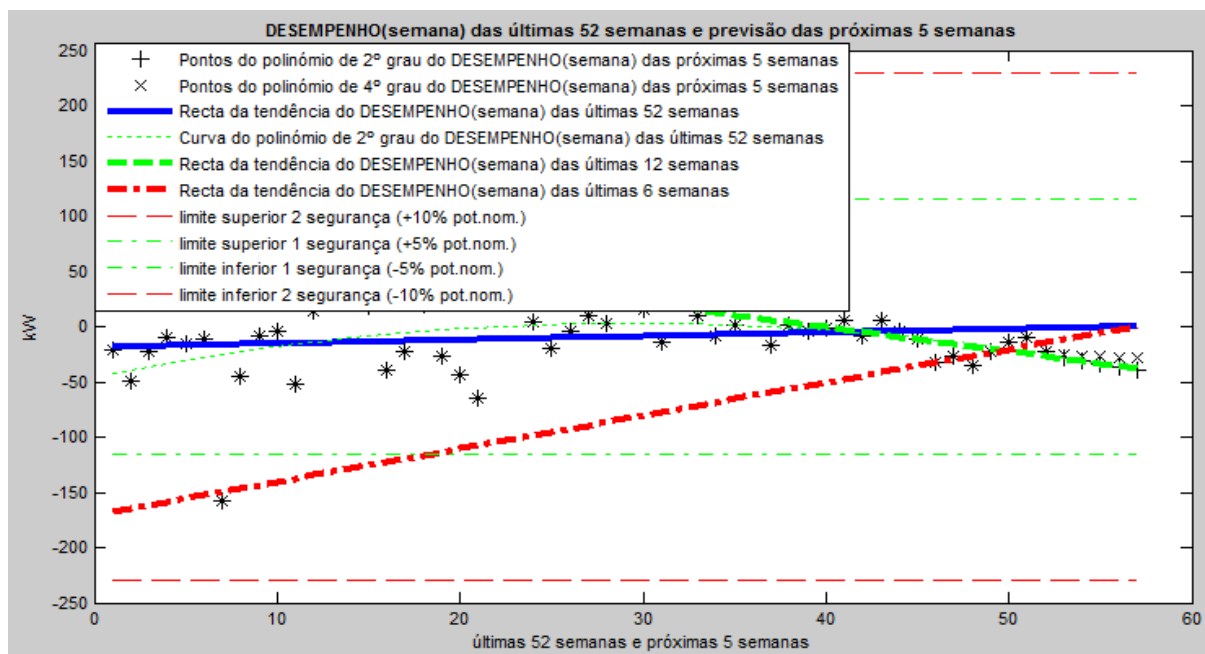


Figura 5.21 – Gráfico da variação do  $DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da reparação das pás na TE7

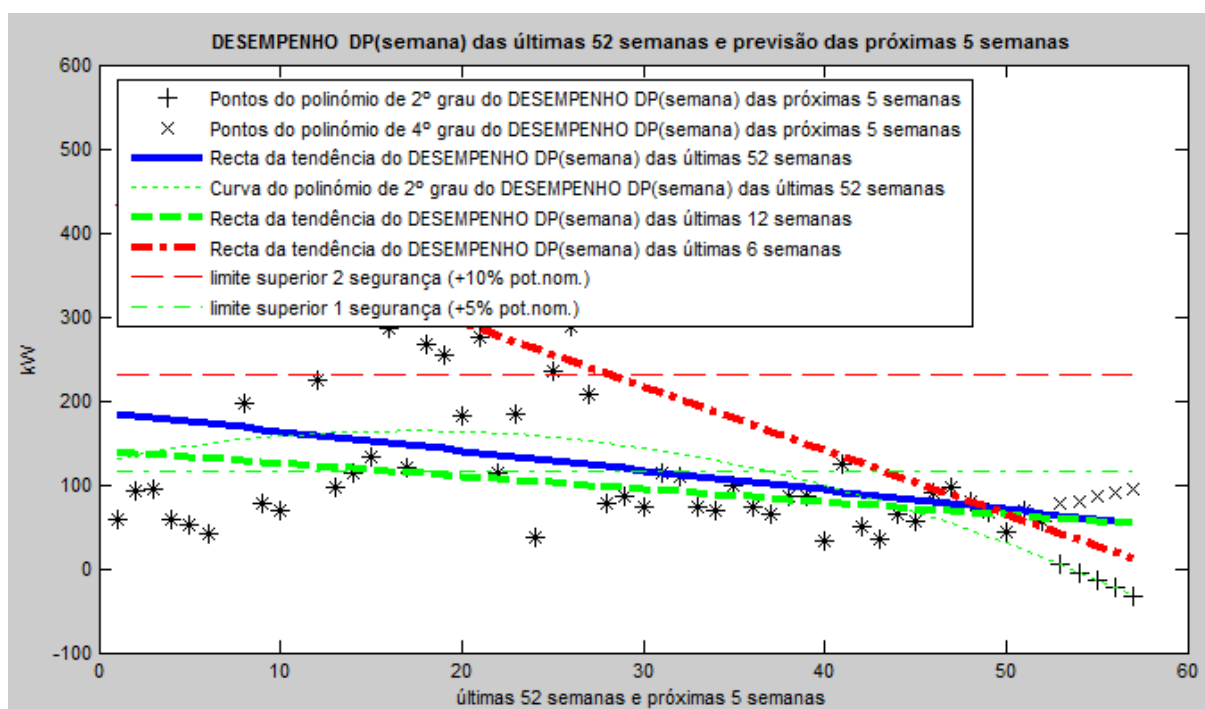


Figura 5.22 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES(sem)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da reparação das pás na TE7

Observa-se nas figuras 5.21 e 5.23 o sinal dado pelas retas das tendências das médias do desempenho é quase sempre positivo, o que indica melhoria de funcionamento da TE7 para o futuro.

Verifica-se nas figuras 5.22 e 5.24 o sinal dado pelas retas das tendências dos desvios padrão do desempenho é sempre negativo, o que indica melhoria de funcionamento da TE7 para o futuro.

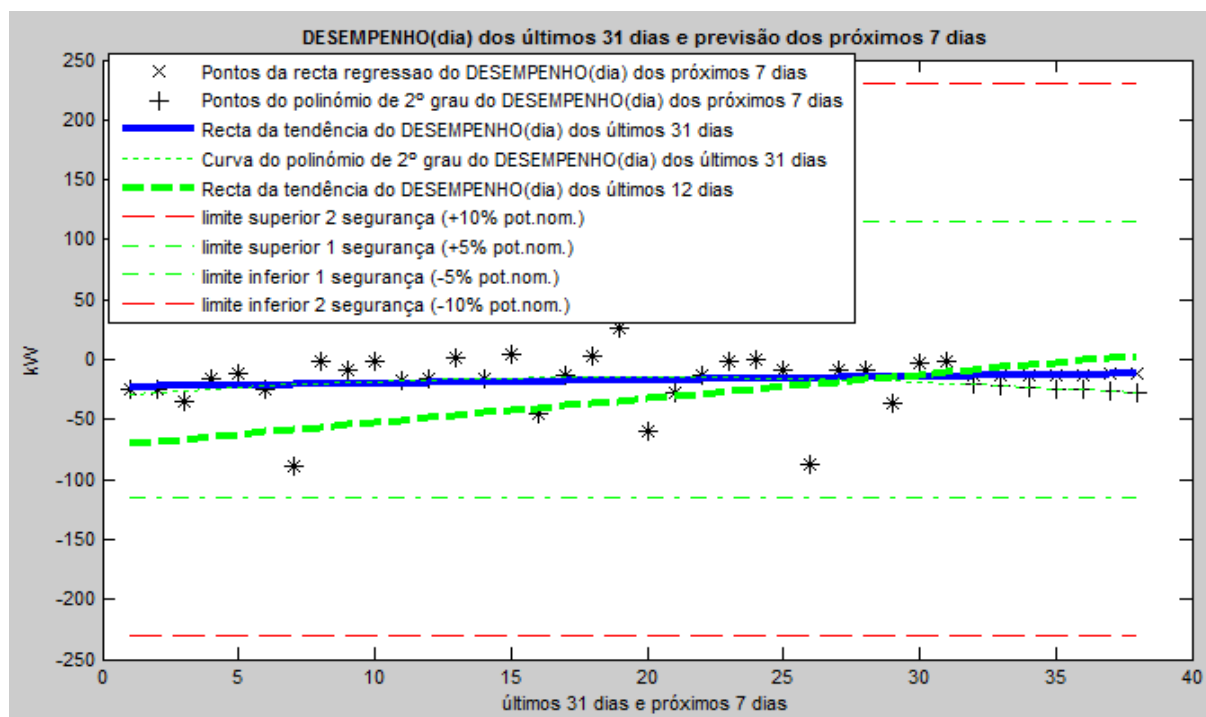


Figura 5.23 – Gráfico da variação do  $DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da reparação das pás na TE7

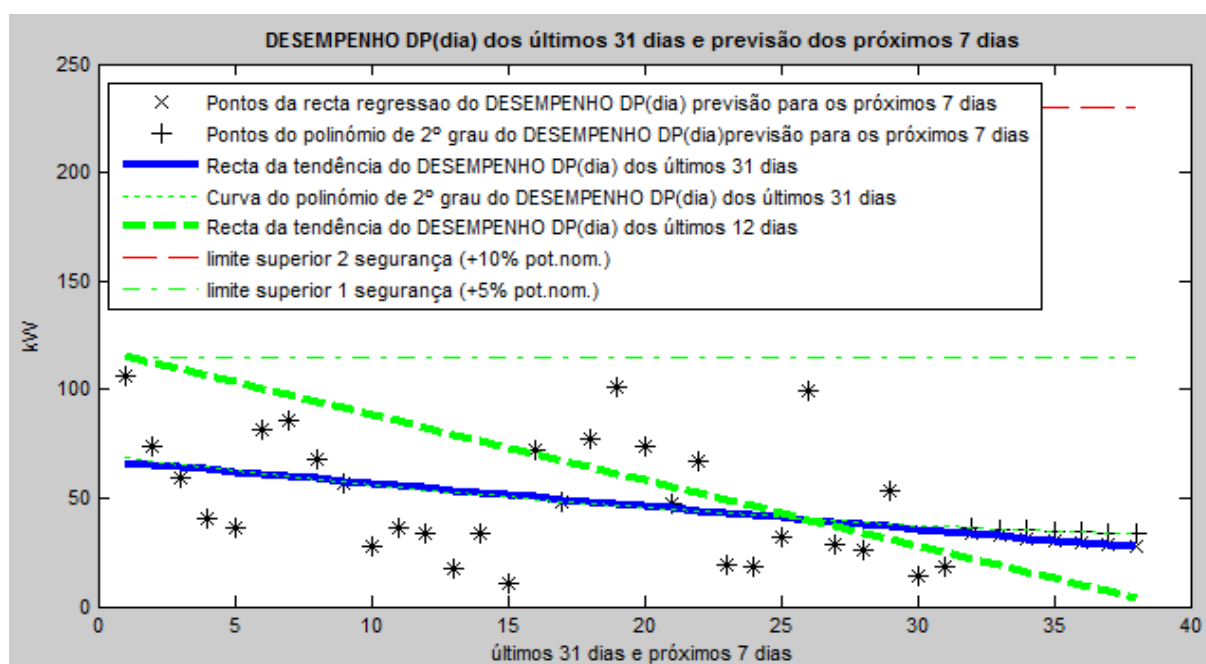


Figura 5.24 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da reparação das pás na TE7

Em relação à substituição do rolamento de suporte do veio de alta rotação fez-se uma análise na TE4, aplicando as metodologias 3 e 4, para o período anterior à intervenção em 01/03/2010.

Nas figuras 5.25 e 5.26 são apresentados os principais gráficos das análises efetuadas aos dados do SCADA da TE4 das 52 semanas anteriores e nas figuras 5.27 e 5.28 dos 31 dias anteriores à substituição do rolamento de suporte do veio de alta rotação.

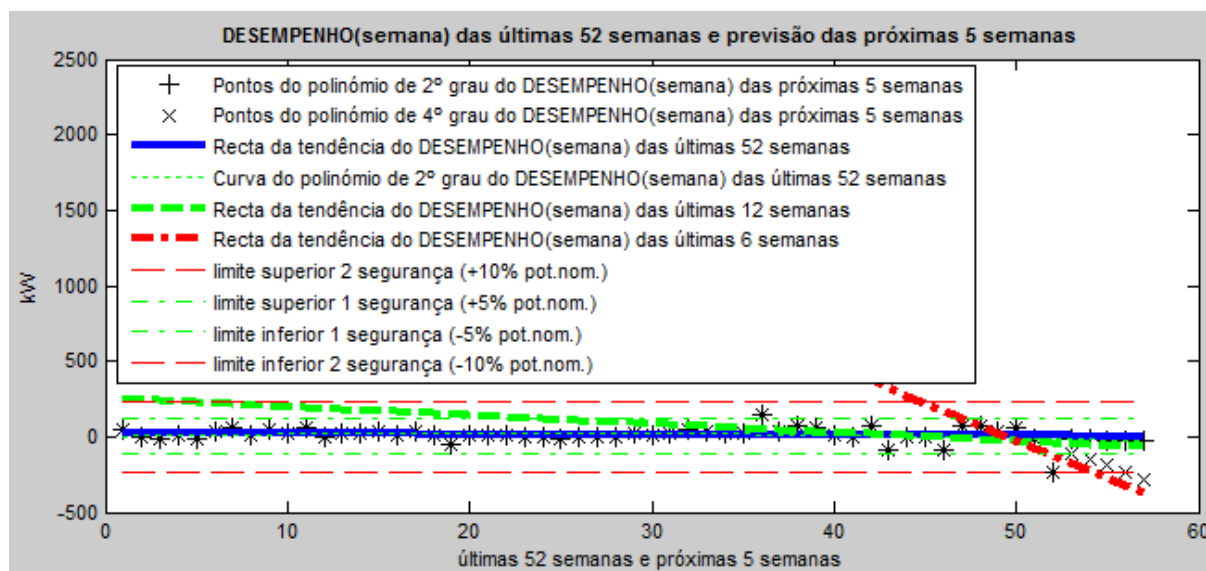


Figura 5.25 – Gráfico da variação da  $DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição do rolamento de suporte do veio de alta rotação na TE4

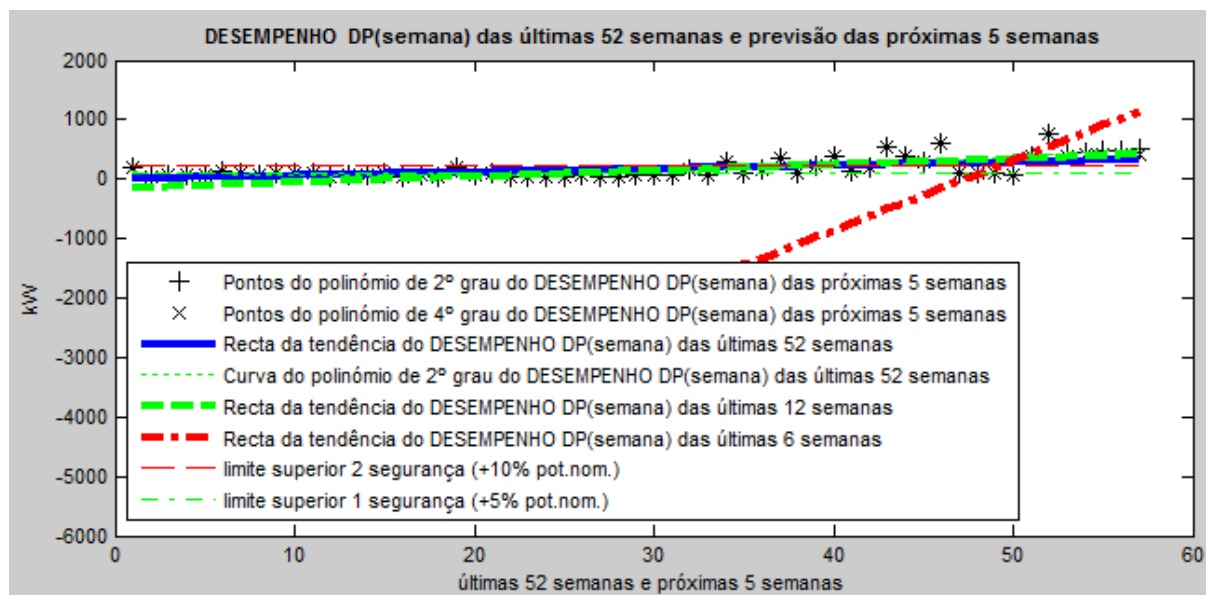


Figura 5.26 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES_{(semana)}}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição do rolamento de suporte do veio de alta rotação na TE4

Observa-se nas figuras 5.25 e 5.27 o sinal dado pelas retas das tendências das médias do desempenho é sempre negativo, o que indica de teorização do funcionamento da TE4 para o futuro.

Constata-se nas figuras 5.26 e 5.28 o sinal dado pelas retas das tendências dos desvios padrão do desempenho é sempre positivo, o que indica de teorização do funcionamento da TE4 para o futuro.

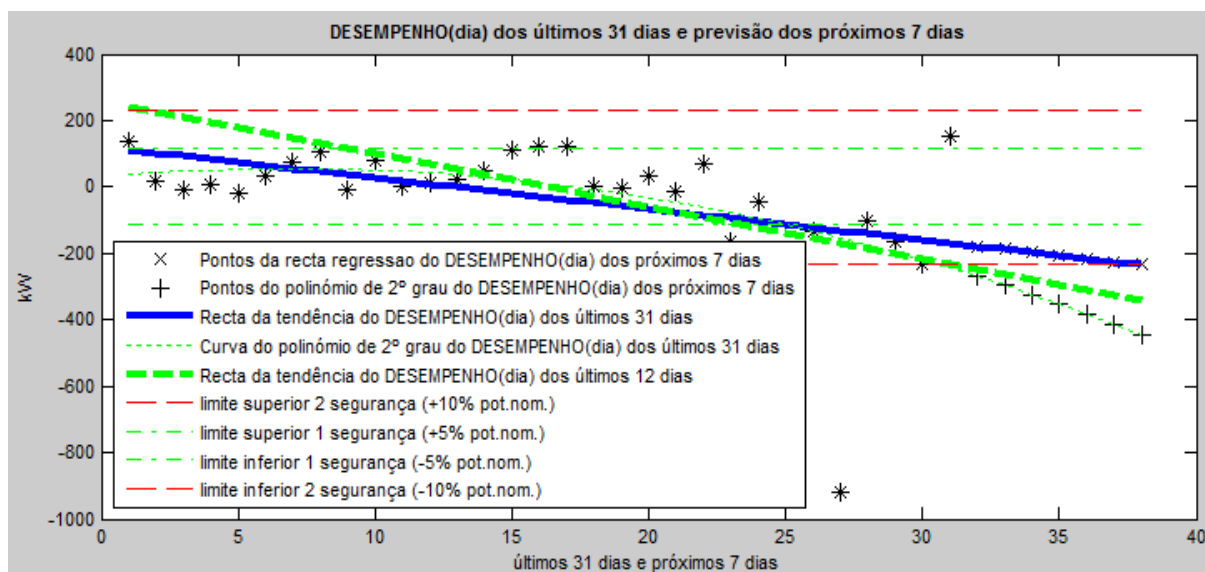


Figura 5.27 – Gráfico da variação do  $DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição do rolamento de suporte do veio de alta rotação na TE4

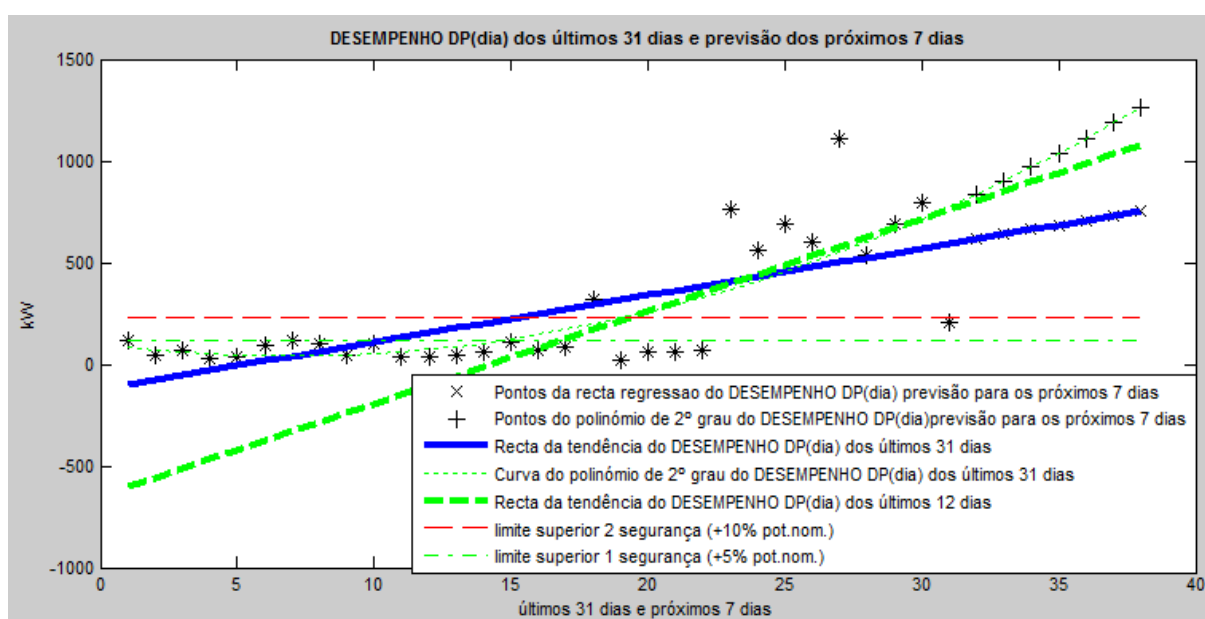


Figura 5.28 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição do rolamento de suporte do veio de alta rotação na TE4

Em relação à substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora fez-se uma análise na TE4, aplicando as metodologias 3 e 4, para o período anterior à intervenção em 22/02/2012.

Nas figuras 5.29 e 5.30 são apresentados os principais gráficos da aplicação da metodologia 3 às 52 semanas anteriores à substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora e nas figuras 5.31 e 5.32 da aplicação da metodologia 4 aos 31 dias anteriores à substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora.

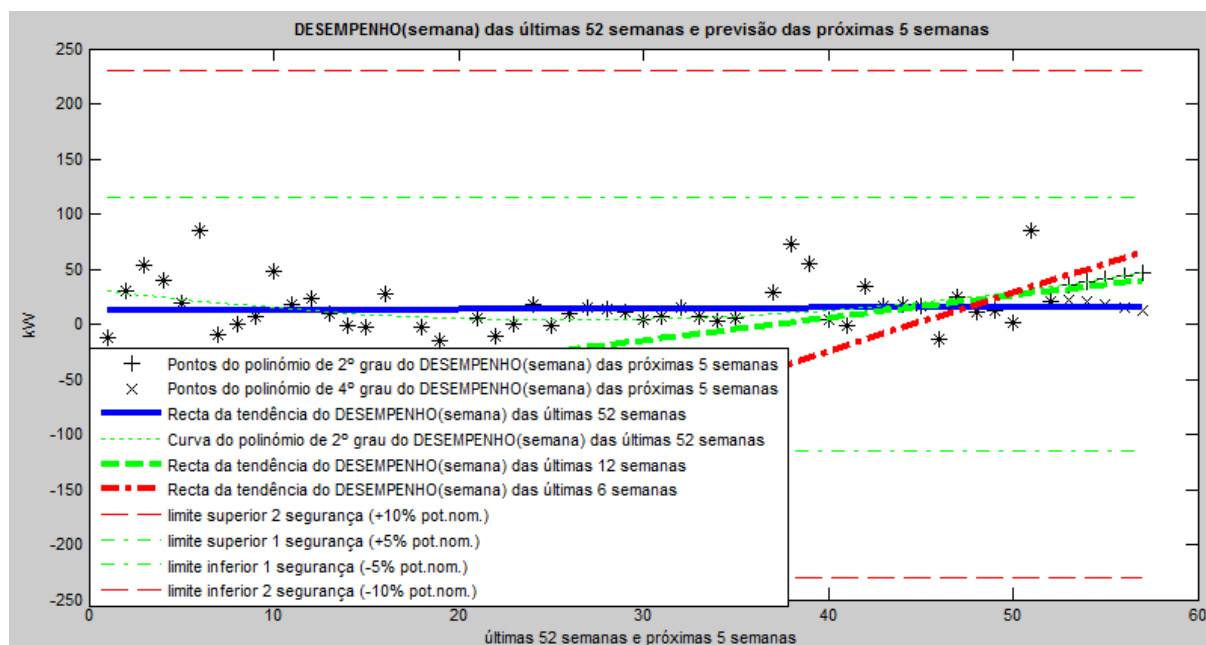


Figura 5.29 – Gráfico da variação da  $DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora na TE4

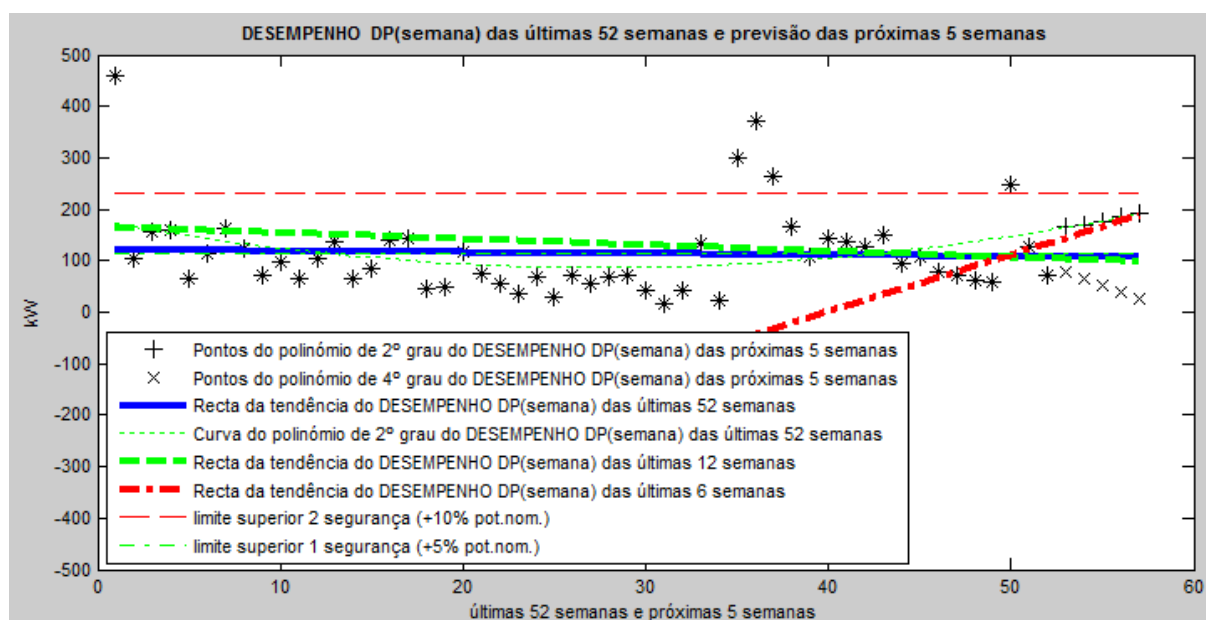


Figura 5.30 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES( semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora na TE4

Constata-se nas figuras 5.29 e 5.31 o sinal dado pelas retas das tendências das médias do desempenho é quase sempre positivo, o que indica a previsão de melhoria do funcionamento da TE4 para o futuro.

Verifica-se nas figuras 5.30 e 5.32 o sinal dado pelas retas das tendências dos desvios padrão do desempenho é contraditório, às vezes positivo e outras vezes negativo, o que não indica um sinal para o futuro.

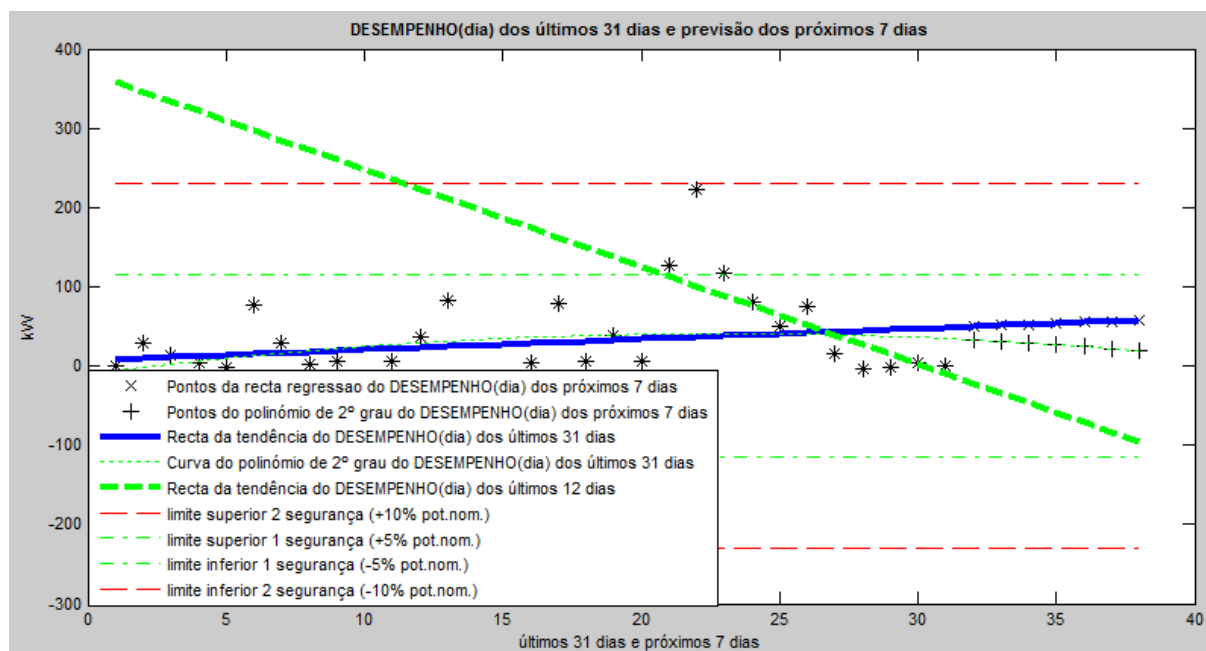


Figura 5.31 – Gráfico da variação do  $DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora na TE4

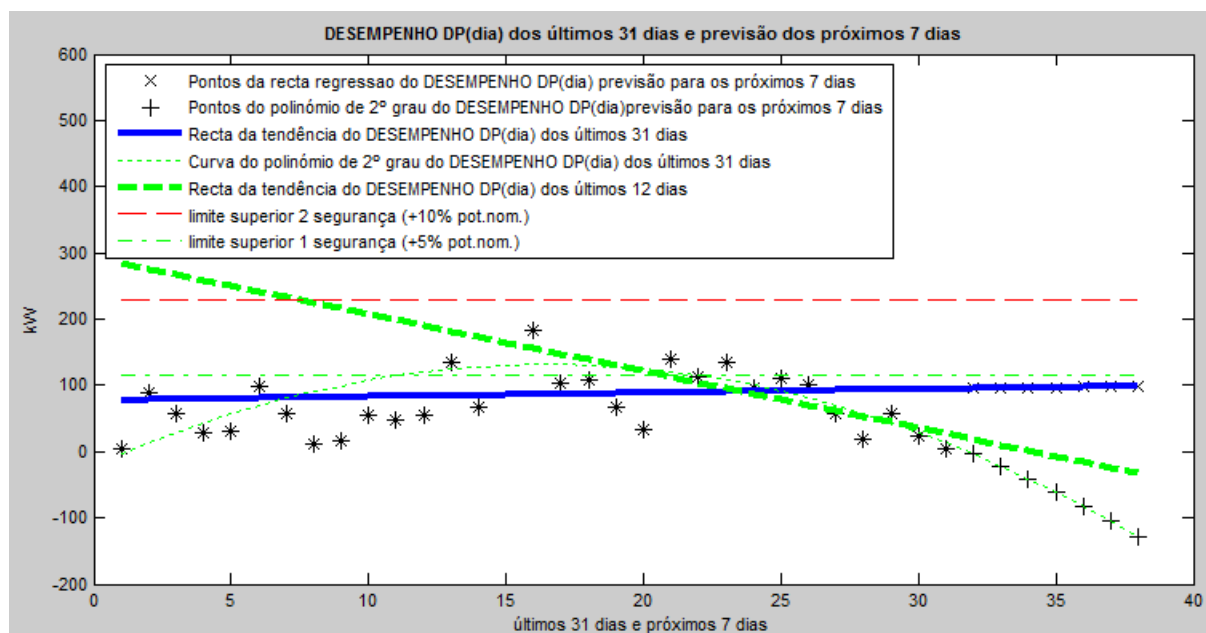


Figura 5.32 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora na TE4



Em relação à substituição da caixa redutora do sistema *Yaw* fez-se uma análise na TE1, aplicando as metodologias 3 e 4, para o período anterior à intervenção em 11/11/2011.

Nas figuras 5.33 e 5.34 são apresentados os principais gráficos das análises efetuadas aos dados do *SCADA* da TE1 das 52 semanas anteriores e nas figuras 5.35 e 5.36 dos 31 dias anteriores à substituição da caixa redutora do sistema *Yaw*.

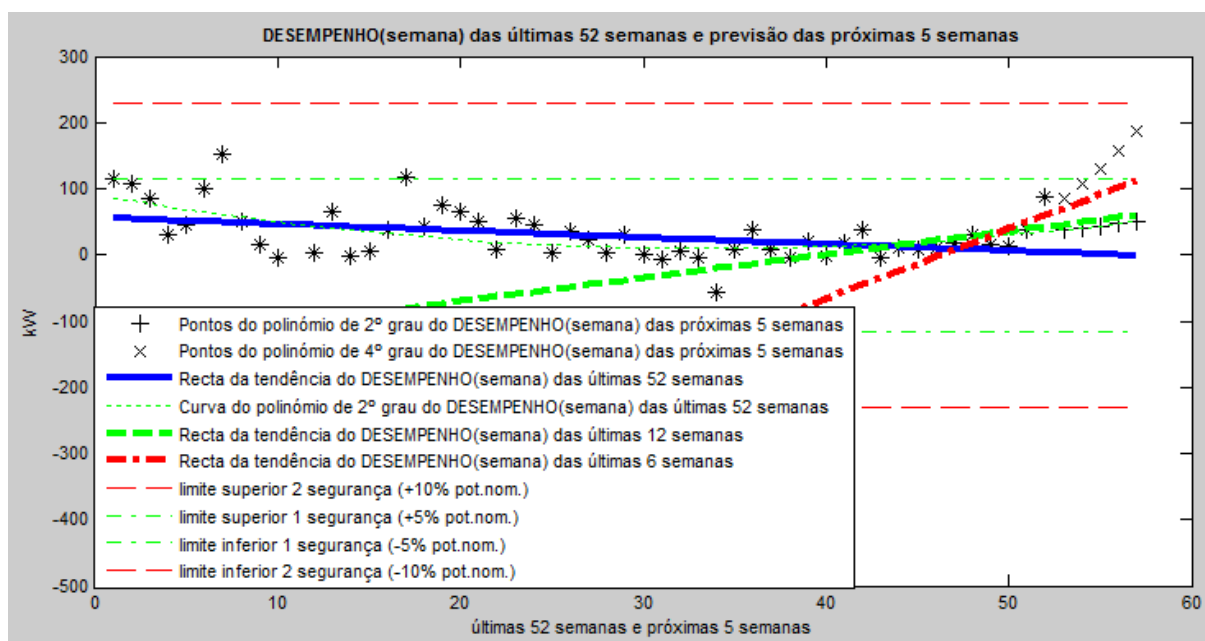


Figura 5.33 – Gráfico da variação da  $DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição da caixa redutora do sistema *Yaw* na TE1

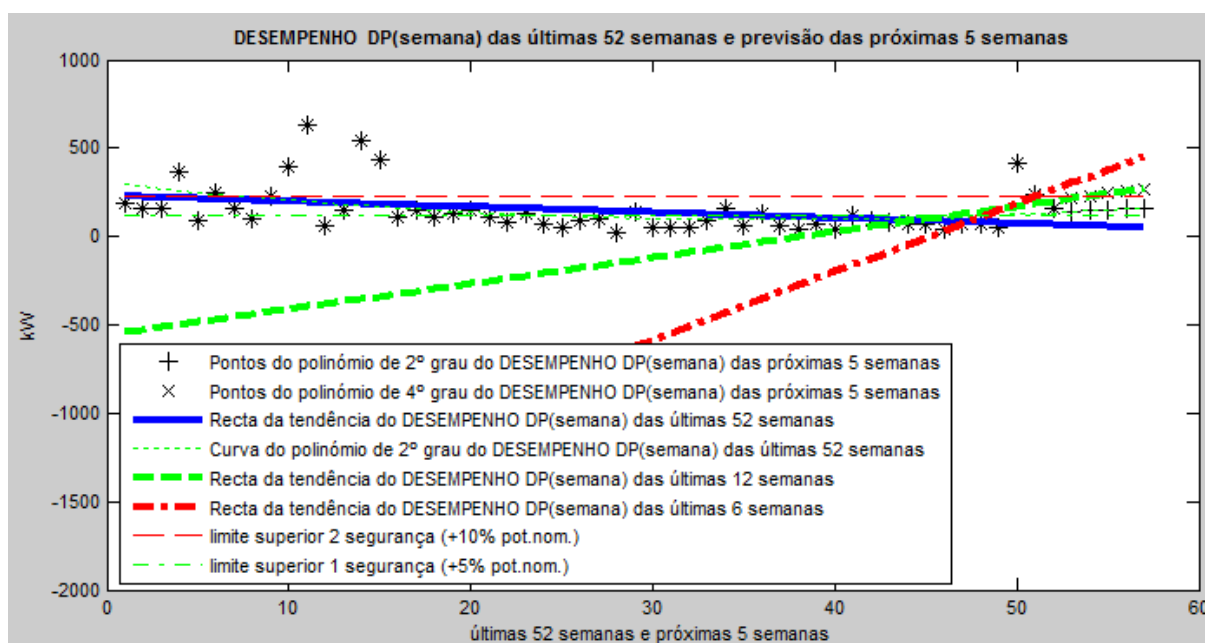


Figura 5.34 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES_{(semana)}}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição da caixa redutora do sistema *Yaw* na TE1

Constata-se nas figuras 5.33 e 5.35 o sinal dado pelas retas das tendências das médias do desempenho é quase sempre positivo, o que indica melhoria do funcionamento da TE1 para o futuro.

Verifica-se nas figuras 5.34 e 5.36 o sinal dado pelas retas das tendências dos desvios padrão do desempenho é incerto, às vezes positivo e outras vezes negativo, o que não sinaliza nada para o futuro funcionamento da TE1.

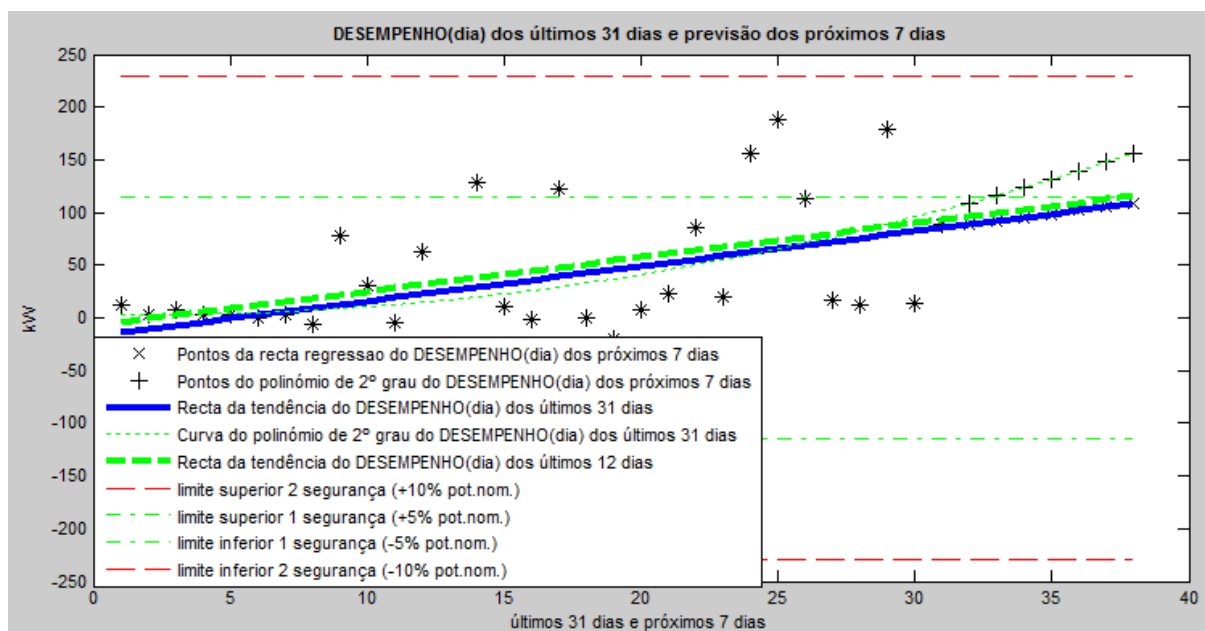


Figura 5.35 – Gráfico da variação do  $DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição da caixa redutora do sistema *Yaw* na TE1

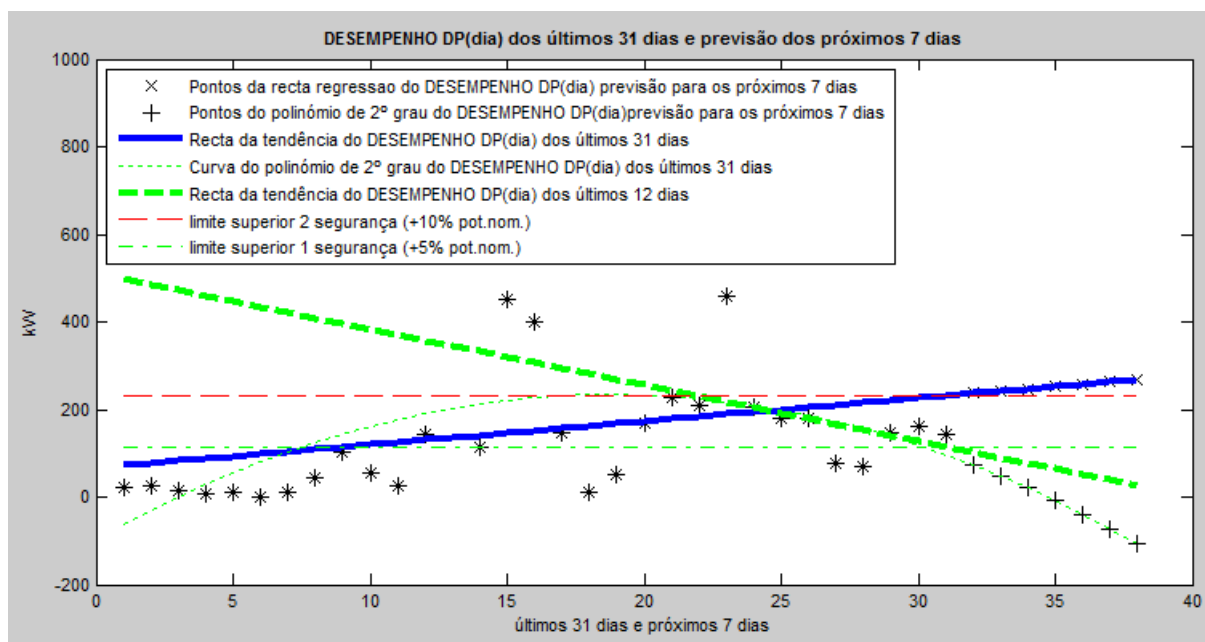


Figura 5.36 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES_{(dia)}}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição da caixa redutora do sistema *Yaw* na TE1



Em relação à substituição do motor do sistema *Yaw* fez-se uma análise na TE7, aplicando as metodologias 3 e 4, para o período anterior à intervenção em 01/05/2009.

Nas figuras 5.37 e 5.38 são apresentados os principais gráficos da aplicação da metodologia 3 às 52 semanas anteriores e nas figuras 5.39 e 5.40 da aplicação da metodologia 4 aos 31 dias anteriores à substituição do motor do sistema *Yaw*.

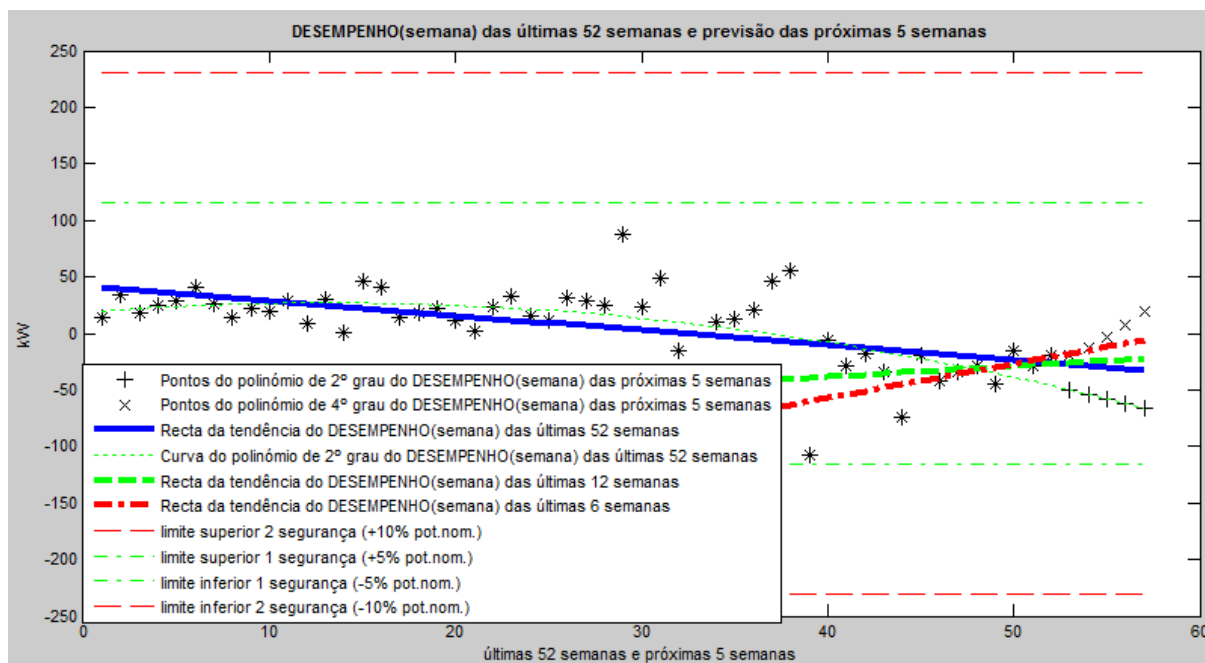


Figura 5.37 – Gráfico da variação da  $DES_{(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição do motor do sistema *Yaw* na TE7

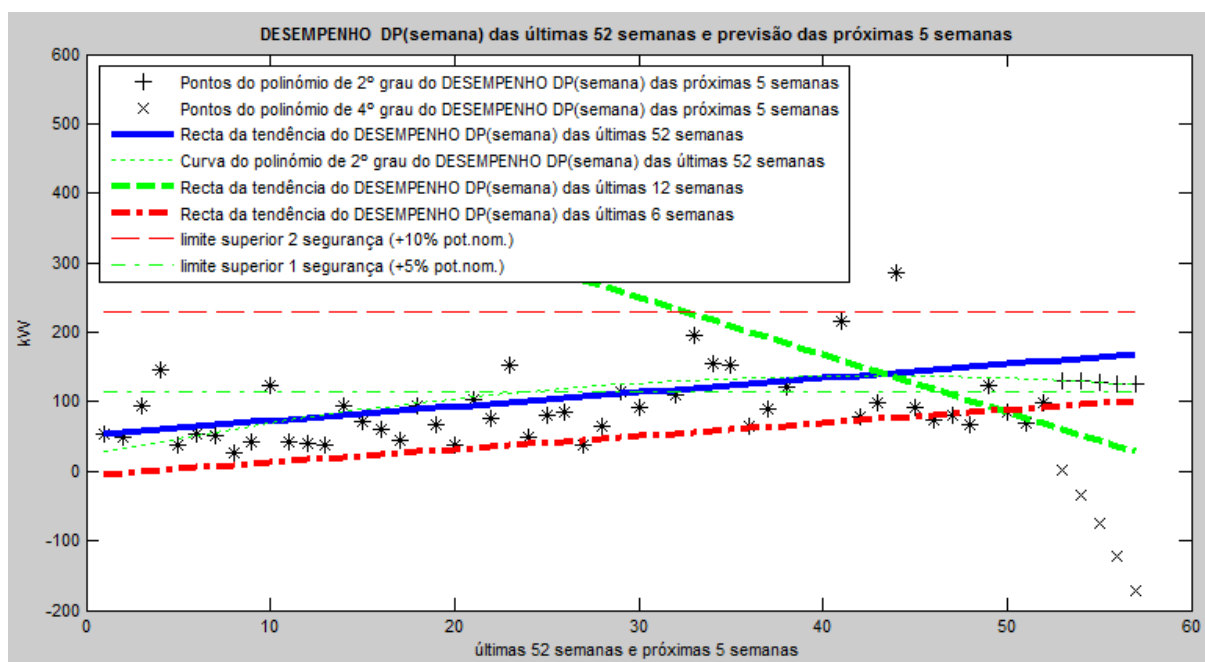


Figura 5.38 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES(semana)}$ , sem filtros, ao longo das últimas 52 semanas e a previsão para as próximas 5 semanas, antes da substituição do motor do sistema *Yaw* na TE7

Constata-se nas figuras 5.37 e 5.39 o sinal dado pelas retas das tendências das médias do desempenho é quase sempre positivo, o que indica melhoria do funcionamento da TE7 para o futuro.

Observa-se nas figuras 5.38 e 5.40 o sinal dado pelas retas das tendências dos desvios padrão do desempenho é quase sempre positivo, o que indica de teorização do funcionamento da TE7 para o futuro.

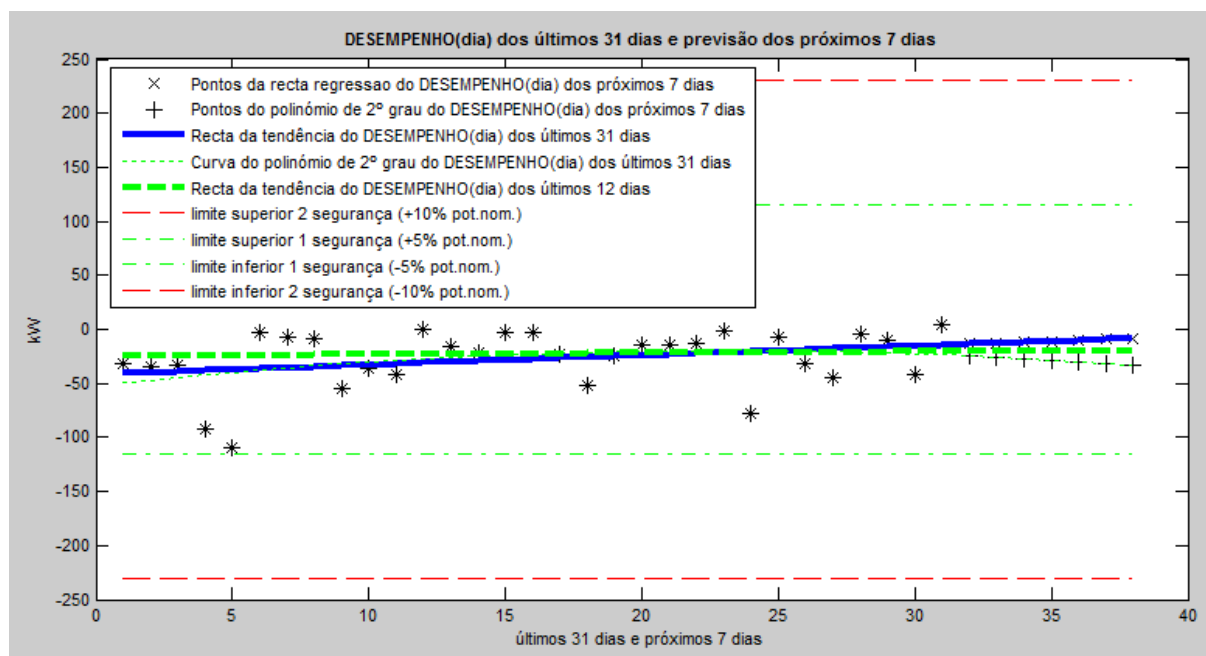


Figura 5.39 – Gráfico da variação do  $DES_{(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição do motor do sistema *Yaw* na TE7

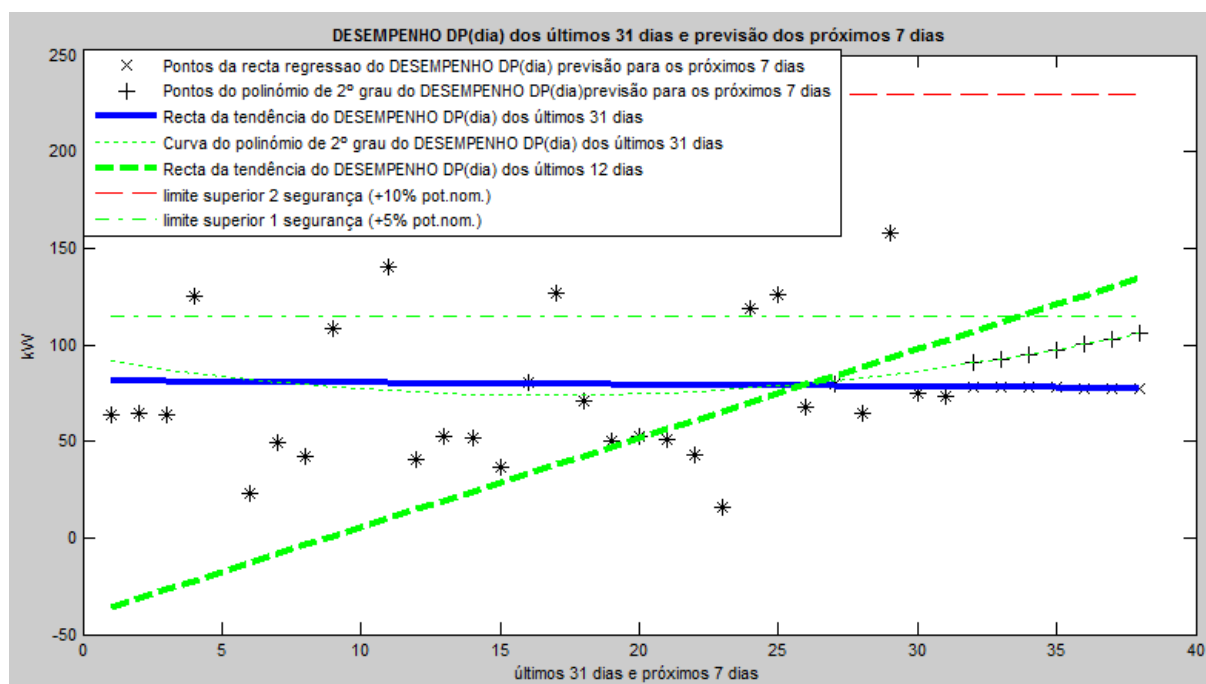


Figura 5.40 – Gráfico da variação do  $\sigma_{DES(dia)}$ , sem filtros, ao longo dos últimos 31 dias e a previsão para os próximos 7 dias, antes da substituição do motor do sistema *Yaw* na TE7

## Capítulo 6 - Conclusões e trabalhos futuros

Ao longo desta dissertação foram apresentados seis modelos, um para determinar a curva de potência de referência, outro para avaliar o funcionamento e quatro para prever o desempenho e a eficiência de TEs. Os seis modelos permitiram o desenvolvimento de quatro programas, o `Calcular_M_Vol_Ref_Curva_Pot_Ref` para determinar a curva de potência de referência, o `AnaliTE2` para avaliar o funcionamento e para prever o desempenho de TEs (sem filtros), o `AnaliTE_CEP_52semanas` e o `AnaliTE_CEP_31dias` para prever a eficiência de TEs (com filtros).

As metodologias desenvolvidas partiram da ideia que antes de uma avaria grave o desempenho e a eficiência da TE diminuem e a partir deste princípio pode-se antecipar futuras avarias pela monitorização do desempenho e a eficiência da TE, que quando começa a diminuir é um sinal que indica que uma avaria grave se aproxima e que quando atinge determinados limites de segurança e manutenção emite avisos de ações de manutenção preditiva.

O programa `Calcular_M_Vol_Ref_Curva_Pot_Ref` aplica a metodologia 1 para calcular a massa volúmica de referência e a curva de potência de referência de uma TE.

O programa `AnaliTE2` aplica a metodologia 2 para avaliar o funcionamento da TE para o período de um ano, através das análises anual, mensal, direcional e em função da velocidade do vento. Os principais parâmetros calculados são a velocidade média, a temperatura média, a pressão atmosférica média, a MV média e a energia disponível no vento. A energia real produzida, a energia teórica que devia produzir, o desempenho, a eficiência, o rendimento, o fator de utilização e a produtividade da TE.

O programa `AnaliTE2` aplica também a metodologia 3 anual/semanal e a metodologia 4 mensal/diária para analisar e prever o desempenho da TE (sem filtros) para as próximas 5 semanas e os próximos 7 dias, através do cálculo das médias, desvios padrão e tendências do desempenho por semana e por dia.

O programa `AnaliTE_CEP_52semanas` aplica a metodologia 5 para analisar a eficiência da TE ao longo das últimas 52 semanas e prever a eficiência para as próximas 5 semanas (com filtros) para intervalos de 0,5 m/s de velocidade do vento, para  $v = 6$  m/s [5,75-6,25], para  $v = 8$  m/s [7,75-8,25], para  $v = 10$  m/s [10,75-11,25] e para  $v = 12$  m/s [11,75-12,25].

O programa `AnaliTE_CEP_31dias` aplica a metodologia 6 para analisar a eficiência da TE ao longo dos últimos 31 dias e prever a eficiência para os próximos 5 dias (com filtros) para intervalos de 0,5 m/s de velocidade do vento, para  $v = 6$  m/s [5,75-6,25], para  $v = 8$  m/s [7,75-8,25], para  $v = 10$  m/s [10,75-11,25] e para  $v = 12$  m/s [11,75-12,25].

A grande diferença das metodologias 5 e 6 dos programas `AnaliTE_CEP_52semanas` e `AnaliTE_CEP_31dias` em relação às metodologias 3 e 4 do programa `AnaliTE2` é de usarem filtros para a temperatura, para a pressão atmosférica e para a potência real, que permitem eliminar os dados anormais e só os dados validados pelos filtros é que são usados para analisar a eficiência da TE.

É chegada a altura de retirar conclusões das análises efetuadas e propor novas análises e metodologias, já que esta dissertação não finaliza o objetivo final, nem nunca foi essa a meta, mas sim mais um paço para alcançar uma produção e uma manutenção mais eficiente e mais fiável de TEs.

## 6.1. Conclusões

O objetivo da metodologia 1 aplicada no programa Calcular\_M\_Vol\_Ref\_Curva\_Pot\_Ref de determinar a MV de referência e a curva de potência de referência da TE para um determinado local, para um determinado período de tempo e para as respectivas condições meteorológicas foi alcançado.

Uma das conclusões que se pode retirar deste programa, pela observação da figura 2.3, é que a potência teórica de uma TE Nordex N90 indicada pelo fabricante, para a mesma velocidade do vento de 10 m/s normalizada, pode variar em  $\pm 391$  kW de  $\pm 1.342$  kW até  $\pm 1.733$  kW para uma variação da MV do ar de  $1,015 \text{ kg/m}^3$  até  $1,305 \text{ kg/m}^3$ , ou seja a potência teórica, indicada pelo fabricante, pode variar  $\pm 30$  % para a mesma velocidade do vento.

Pode também concluir-se que se a diferença das MVs do ar fosse maior, a diferença de potência indicada pelo fabricante, para a mesma TE e para a mesma velocidade do vento seria ainda maior, daí a importância de calcular e definir corretamente a MV de referência utilizada para analisar o desempenho e a eficiência da TE ao longo do tempo.

O objetivo da metodologia 2 aplicada no programa AnaliTE2 para avaliar o funcionamento da TE para o período de um ano, através da análise anual, por mês, por direção e em função da velocidade do vento foi alcançado.

Dos dois PEs analisados, o PE1 com cinco TEs e o PE2 com oito TEs, retiram-se muitas conclusões, que podem ser retiradas para outros PEs e para outras TEs, tendo em atenção a necessidade de algumas modificações nos programas em MATLAB e nas metodologias (como por exemplo a não existência de curvas de potência de referência teórica da TE fornecidas pelo fabricante da TE, neste caso é necessário determinar primeiro a curva de potência de referência teórica da TE, utilizando por exemplo o método dos intervalos de velocidade utilizado no programa AnaliTE\_CEP\_52semanas para calcular as curvas de potência real com e sem filtros).

Pode calcular-se por exemplo a variação do desempenho médio anual de cada PE e de cada TE, ao longo dos anos, dos meses, determinar quais as TEs que tiveram os piores desempenhos médios anuais por comparação e de seguida tentar encontrar as causas desses desempenhos.

Uma das conclusões que se pode retirar da análise dos gráficos da figura 5.2 à 5.4 e da análise dos registos das intervenções da manutenção na TE5, é que o desempenho tão baixo em janeiro e fevereiro de 2009 da TE5 foi devido à substituição da caixa multiplicadora de decorreu de 14/01/2009 a 20/02/2009.

As metodologias 3 e 4 foram aplicadas aos períodos anteriores às avarias das caixas multiplicadoras nas TE1, TE2 e TE5.

Pode concluir-se pela análise dos valores obtidos visíveis na tabela 5.15 e pelos gráficos da figura 5.9 à 5.12 que existem sinais contraditórios, o que impossibilita retirar conclusões para as previsões futuras do desempenho destas três TEs, isto é, para estas três TEs não existe uma diminuição inequívoca da média do desempenho semanal, nem um aumento do desvio padrão desempenho semanal, nem uma diminuição da média do desempenho diário, nem um aumento do desvio padrão desempenho diário que leve a concluir que a caixa multiplicadora vai avariar proximamente, ou seja, não se verifica o princípio teórico idealizado, que antes de uma avaria grave de uma TE existe tendência de perda de desempenho, portanto não era possível emitir avisos de manutenção preditiva antes destas avarias e muito menos afirmar que estas TEs iriam avariar no próximo dia ou na próxima semana.

As metodologias 3 e 4 também foram aplicadas aos períodos anteriores à avaria do inversor do sistema *Pitch* 2 da TE3, à reparação nas pás da TE7, à avaria do rolamento de suporte do veio de alta rotação da TE4, à substituição de alguns rolamentos da caixa multiplicadora da TE4, à substituição da caixa redutora do sistema *Yaw* da TE1 e à substituição do motor do sistema *Yaw* da TE7.

Pode concluir-se pela análise dos gráficos da figura 5.17 à 5.40 que existem sinais contraditórios, o que impossibilita retirar conclusões para as previsões futuras do desempenho destas TEs nestas situações, isto é, para estas TEs não existe uma diminuição inequívoca da média do desempenho semanal, nem um aumento do desvio padrão desempenho semanal, nem uma diminuição da média do desempenho diário, nem um aumento do desvio padrão desempenho diário que leve a concluir que vão avariar proximamente, ou seja, não se verifica o princípio teórico idealizado, que antes de uma avaria grave de uma TE existe tendência de redução da média do desempenho e do aumento do desvio padrão do desempenho, portanto não era possível emitir avisos de manutenção preditiva antes destas avarias e muito menos afirmar que estas TEs iriam avariar no próximo dia ou na próxima semana.

As metodologias 5 e 6 foram aplicadas aos períodos anteriores às avarias das caixas multiplicadoras nas TE1, TE2 e TE5.

Pode concluir-se pela análise dos valores obtidos visíveis na tabela 5.16 e pelos gráficos da figura 5.13 à 5.16 que existem sinais contraditórios, o que impossibilita retirar conclusões para as previsões futuras da eficiência destas três TEs, isto é, para estas três TEs não existe uma diminuição inequívoca da média da eficiência semanal, nem uma diminuição da média da eficiência diária que leve a concluir que a caixa multiplicadora vai avariar proximamente, ou seja, não se verifica a hipótese teórica idealizada, que antes de uma avaria grave numa TE existe tendência de perda de eficiência, portanto não era possível emitir avisos de manutenção preditiva antes destas avarias e muito menos afirmar que estas TEs iriam avariar no próximo dia ou na próxima semana.

A conclusão final a que se chega com esta dissertação é que não se pode retirar sinais conclusivos para a manutenção preditiva pela análise do desempenho e da eficiência destas TEs com estas metodologias.

A ideia teórica de que a média do desempenho semanal, a média do desempenho diário, a média da eficiência semanal e a média da eficiência diária da TE diminuem com o aproximar de uma avaria grave não é observada nas TEs analisadas com estas metodologias.

A hipótese teórica que o desvio padrão do desempenho semanal e o desvio padrão do desempenho diário aumentam com o aproximar de uma avaria grave não é observado nas TEs analisadas com estas metodologias.

As metodologias 2, 3, 4, 5 e 6 para avaliar o funcionamento, analisar e prever o desempenho e a eficiência de TEs pode ser útil para monitorizar e gerir a produção e para otimizar a produção energética, mas não permite retirar informações importantes para a manutenção preditiva destas TEs.

## **6.2. Trabalhos futuros**

Em termos de trabalhos futuros é fundamental abrir novos caminhos de investigação na manutenção preditiva de TEs. Em primeiro lugar deve-se monitorizar e analisar novas variáveis de controlo como por exemplo a frequência de vibração de cada pá, do veio principal, dos rolamentos principais, da caixa multiplicadora, do gerador, a temperatura dos rolamentos

principais, da caixa multiplicadora e do gerador. Em segundo lugar deve-se criar um sistema inteligente de diagnóstico de avarias, que consiga conjugar a monitorização, análise e previsão de todas as variáveis de controlo, de maneira a poder prever com mais fiabilidade e exatidão o órgão ou o sistema que irão avariar e daqui a quanto tempo e tentar associar as probabilidades a estas previsões. De seguida o sistema deve evoluir para um sistema de monitoramento baseado na leitura *on-line* remota de dados. Por fim, melhorar o *interface* do programa, novos relatórios, novas tabelas, novos gráficos (onde seja possível visualizar simultaneamente uma ou mais variáveis de controlo de várias TEs – através de gráficos 3D ou gráficos com vários planos, em que cada plano representa uma variável de uma TE e pode ser ou não visível), para tornar o programa comercial, mais fácil de utilizar pelos potenciais utilizadores da manutenção, de modo a poderem atingir o objetivo final de reduzir os custos de manutenção e otimizar o ativo TE com a maximização da produção elétrica com custos mínimos.

## Bibliografia

Andrawus, Jesse Agwandas (2008). *Maintenance Optimisation for Wind Turbines. A thesis for the degree of Doctor. The Robert Gordon University.*

Aubyn, António St., Venes, Nuno (2011, Setembro). *Análise de Dados, aplicações às ciências económicas e empresariais*, Verlag Dashofer.

Brandao, R. F. Mesquita, Carvalho, J. A. Beleza & Barbosa, F. P. Maciel (2008). *Forced Outage Time Analysis of a Portuguese Wind Farm, IEEE.*

Carlsson, F., Eriksson, E. & Dahlberg, M. (2010, August). *Damage preventing measures for wind turbines, Phase 1 – Reliability data, Elforsk report 10:68.*

Caselitz, P., Giebhardt, J., Mevenkamp, M. & Reichardt, M. (1997). *Application of condition monitoring system in wind energy converters, Proceedings of the EWEC'97, Dublin, pp. 579-582.*

Caselitz, P., Giebhardt, J. (1999). *Advanced condition monitoring for wind energy converters, Proceedings of the EWEC'99, Nizza.*

Caselitz, P., Giebhardt, J. (2005). *Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters. J. Solar Energy Eng 2005, pp. 127-253.*

Castro, Rui (2011, Abril). *Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-hídrica*, 1ª edição, Instituto Superior Técnico, pp. 167-221.

EDP Renováveis (2010, Novembro). *The Changing direction of owner / operators towards a consistent, reliable, durable and repeatable system of operation and maintenance.*

EWEA (2011, July). *Pure Power Wind energy targets for 2020 and 2030, The European Wind Energy Association*

Farinha, José M. T. (2011, Abril). *A terologia e as Novas Ferramentas de Gestão*, 1ª edição, Monitor.

Fonseca, I. (2010). Manutenção de Sistemas de Geração de Energia Renovável Eólica através de Redes IP. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Fontes, Fernando (2009). Métodos numéricos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Hameed, Z., Hong, Y.S., Cho, Y.M., Ahn, S.H. & Song, C.K. (2006). *Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 2006, pp. 1-39.

Iberwind (2012, Setembro). <http://www.iberwind.pt> - última consulta: Setembro de 2012.

INEGI (2009, Dezembro). Parques Eólicos em Portugal - Dezembro de 2009, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, UP.

International standard IEC 61400-12-1 (2005, December). Wind turbines – part 12-1: *Power performance measurements of electricity producing wind turbines, First edition*.

Kusiak, A., Wenyan, Li (2010). *The prediction and diagnosis of wind turbine faults*.

Llombart, A., Watson, S. J., Llombart, D. & Fandos, J.M. (2005). *Power Curve Characterization I: improving the bin method*. Fundacion CIRCE, department of Electrical Engineering, Zaragoza University.

Llombart, A., Watson, S. J., Llombart, D. & Fandos, J.M. (2005). *Power Curve Characterization II: modelling using polynomial regression*. Fundacion CIRCE, department of Electrical Engineering, Zaragoza University.

Llombart, A., Pueyo, C., Fandos, J.M. & Guerrero, J.J. (2005). *Robust data filtering in wind power systems*. Fundacion CIRCE, department of Electrical Engineering, Zaragoza University.

Llombart, A. (2005). *Improving the operation and maintenance of wind farms: determination of wind turbine performance*. Fundacion CIRCE, department of Electrical Engineering, Zaragoza University.



Márquez, A.C. (2009). *The maintenance management framework. Journal of Quality in Maintenance Engineering*, pp. 167-178.

McLaughlin, D., Clive, P. & McKenzie, J. (2010, Abril). *Staying Ahead of the Wind Power Curve, Scada data can aid monitoring, Renewable Energy world review*

Morais, V., Vieira, C. (2006, Abril). Matlab 7&6 Curso Completo, 3ª edição, FCA.

Nordex (2008, Dezembro). *Operating Instructions Wind Turbine Class K08 - Type: NORDEX N90/2300, N90/2500.*

Nordex (2004, Abril). *Technical Description NORDEX N90.*

NP EN 13306 (2007). Terminologia da Manutenção. Instituto Português da Qualidade, IPQ.

Pintelon, L. (1992). *Maintenance management decision making. European Journal of Operational Research, Vol. 58, pp. 301-317.*

SKF Portugal (2012, Setembro). [http://www.skf.com/portal/skf\\_pt/home](http://www.skf.com/portal/skf_pt/home) - última consulta: Setembro de 2012.

Takahashi, Y. (1981). *Total Productive Maintenance, a new task for plant managers in Japan. Terotechnology, vol. 2, pp. 79-88.*

Uluyol, O., Parthasarathy, G., Foslien, W. & Kim, K. (2011). *Power Curve Analytic for Wind Turbine Performance Monitoring and Prognostics. Honeywell International, Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society.*

Verbruggen, TW (2003, April). *Wind turbine operation & maintenance based on condition monitoring WT-O. Final report.*

Vestas (2012, Setembro). <http://www.vestas.com/> - última consulta: Setembro de 2012.

WWEA (2012, April). *World Wind Energy Report 2011, World Wind Energy Association*

*WWEA (2012, Setember). Operation and Maintenance of Wind Farms, Wind Turbine Maintenance & Condition Monitoring*

<http://www.wwindea.org/technology/ch03/estructura-en.htm>

## Anexos

### Anexo A – Curvas de potência da TE Nordex N90 para diferentes MV do ar



Bombarch 2, 22848 Norderstedt; Tel: +49 (0)40-50098-0; Fax: +49 (0)40-50098-302

### NORDEX N90 Power Curves at different air densities

kg/m <sup>3</sup>	1,015	1,025	1,035	1,045	1,055	1,065	1,075	1,085	1,095	1,105	1,115	1,125	1,135	1,145	1,155	1,165	1,175	1,185	1,195	1,205	1,215	1,225	1,235	1,245	1,255	1,265	1,275	1,285	1,295	1,305
m/s	Power [kW]																													
4	15	15	15	15	16	16	16	16	17	17	17	18	18	18	18	19	19	19	19	20	20	20	21	21	21	21	22	22	22	23
5	143	145	147	149	151	152	154	156	158	160	161	163	165	167	169	171	172	174	176	178	180	181	183	185	187	189	190	192	194	196
6	278	281	284	287	290	293	296	299	303	306	309	312	315	318	321	325	328	331	334	337	340	343	346	350	353	356	359	362	365	368
7	464	469	474	479	484	489	494	499	504	509	514	519	524	529	534	539	544	549	554	559	564	569	574	579	584	588	593	598	603	608
8	712	720	727	735	742	749	757	764	772	779	786	794	801	809	816	823	831	838	846	853	860	868	875	882	890	897	905	912	919	927
9	1014	1024	1035	1045	1055	1066	1076	1086	1097	1107	1117	1128	1138	1148	1159	1169	1179	1190	1200	1210	1221	1231	1241	1251	1262	1272	1282	1293	1303	1313
10	1342	1355	1369	1382	1396	1409	1423	1436	1450	1463	1477	1490	1504	1517	1531	1544	1558	1571	1585	1598	1612	1625	1639	1652	1666	1679	1693	1706	1720	1733
11	1654	1671	1687	1704	1720	1737	1753	1770	1786	1803	1819	1836	1852	1869	1885	1902	1918	1935	1951	1968	1984	2001	2017	2034	2050	2067	2083	2100	2116	2133
12	1909	1928	1947	1966	1985	2004	2023	2042	2061	2080	2098	2118	2137	2155	2174	2193	2212	2231	2250	2269	2288	2307	2326	2345	2364	2383	2402	2421	2440	2459
13	2097	2117	2138	2159	2180	2201	2221	2241	2261	2281	2301	2321	2341	2361	2381	2401	2421	2441	2461	2481	2501	2521	2541	2561	2581	2601	2621	2641	2661	2681
14	2231	2251	2271	2291	2311	2331	2351	2371	2391	2411	2431	2451	2471	2491	2511	2531	2551	2571	2591	2611	2631	2651	2671	2691	2711	2731	2751	2771	2791	2811
15	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
16	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
17	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
18	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
19	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
20	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
21	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
22	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
23	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
24	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
25	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300

Source: Nordex, 07.02.03

## Anexo B – Procedimento 3.1 para filtrar os dados meteorológicos da pressão e da temperatura

```
% filtro para os dados da pressão e da temperatura para o cálculo da massa  
volúmica de referência
```

```
vel_v= dados_velocidade;  
pot_real= dados_potencia_real;  
pressao= dados_pressao;  
temperatura= dados_temperatura;  
  
a= 600 % limite inferior da pressão em mbar  
b= 1200 % limite superior da pressão em mbar  
e= -20 % limite inferior da temperatura em °C  
f= 50 % limite superior da temperatura em °C  
  
s= size(dados_pressao);  
  
j1= 0;  
i= 0;  
for i= 1:s  
    c= pressao(i);  
    d= temperatura(i);  
    if (c >= a && c <= b && d>= e && d <= f)  
        j1= j1+1;  
        vel_v_p1(j1,1)= vel_v(i);  
        pot_real_p1(j1,1)= pot_real(i);  
        temperatura_p1(j1,1)= temperatura(i);  
        pressao_p1(j1,1)= pressao(i);  
    end  
    i=i+1;  
end
```

Nota: o tamanho dos 4 vetores obtidos - j1 é menor ou igual ao tamanho dos 4 vetores iniciais - s;

### Anexo C – Procedimento 3.2 para determinar a $\rho_{(ref)}$ e a curva de potência de referência das TEs Nordex N90

```
% mv= massa volúmica média para o período
% cp= curva potência de referência para o período
% mv_ref= massa volúmica de referência para o período
% mv_015 a mv_305= curvas de potência dadas pelo fabricante para as
respetivas mv

if ( mv < 1.020 )
    cp= mv_015;
    mv_ref= 1.015;
end
if ( mv >= 1.020 && mv < 1.030 )
    cp= mv_025;
    mv_ref= 1.025;
end
if ( mv >= 1.030 && mv < 1.040 )
    cp= mv_035;
    mv_ref= 1.035;
end
if ( mv >= 1.040 && mv < 1.050 )
    cp= mv_045;
    mv_ref= 1.045;
end
if ( mv >= 1.050 && mv < 1.060 )
    cp= mv_055;
    mv_ref= 1.055;
end
...
...
...
...
...
if ( mv >= 1.290 && mv < 1.300 )
    cp= mv_295;
    mv_ref= 1.295;
end
if ( mv >= 1.300 )
    cp= mv_305;
    mv_ref= 1.305;
end
```

## Anexo D – Procedimento 3.3 para determinar a potência teórica debitada pela TE

```

x= [v_cut_in:v_nominal];
y= potencia_turbina_fabricante_vi(v_cut_in:v_nominal);

pp= spline(x,y);

for i=1:52560
    if v_turb(i,1) < v_cut_in
        p_turb_t(i,1)= 0;
    elseif (v_turb(i,1) >= v_cut_in && v_turb(i,1) < v_nominal)
        x5= v_turb(i,1);
        p_turb_t(i,1)= ppval(pp,x5);
    elseif (v_turb(i,1) >= v_nominal && v_turb(i,1) < v_cut_out)
        p_turb_t(i,1)= potencia_nominal;
    else
        p_turb_t(i,1)= 0;
    end
end
end

```

$$\begin{cases}
 P_{t(10min)} = 0 & \text{para } V_{n(10min)} < V_{cut\_in} \\
 P_{t(10min)} = ppval(pp, V_n) & \text{para } V_{cut\_in} \leq V_{n(10min)} < V_{Nominal} \\
 P_{t(10min)} = P_{Nominal} & \text{para } V_{Nominal} \leq V_{n(10min)} \leq V_{cut\_out} \\
 P_{t(10min)} = 0 & \text{para } V_{n(10min)} > V_{cut\_out}
 \end{cases} \quad (2.1.9)$$

**Anexo E – Procedimento 3.4 para dividir a matriz dos *inputs* dum ano em 12 matrizes, uma por cada direção**

```
j_30= 1;
j_60= 1;
j_90= 1;
j_120= 1;
j_150= 1;
j_180= 1;
j_210= 1;
j_240= 1;
j_270= 1;
j_300= 1;
j_330= 1;
j_360= 1;

for i= 1:52560
    if (direccao(i,1) >= 0 && direccao(i,1) < 30)
        dados_30(j_30,1)= dados2(i,14);
        dados_30(j_30,2)= dados2(i,6);
        dados_30(j_30,3)= dados2(i,7);
        dados_30(j_30,4)= dados2(i,8);
        dados_30(j_30,5)= dados2(i,9);
        dados_30(j_30,6)= dados2(i,10);
        dados_30(j_30,7)= dados2(i,11);
        dados_30(j_30,8)= dados2(i,13);
        j_30= j_30+1;
    elseif (direccao(i,1) >= 30 && direccao(i,1) < 60)
    ...
    elseif (direccao(i,1) >= 60 && direccao(i,1) < 90)
    ...
    elseif (direccao(i,1) >= 90 && direccao(i,1) < 120)
    ...
    elseif (direccao(i,1) >= 120 && direccao(i,1) < 150)
    ...
    elseif (direccao(i,1) >= 150 && direccao(i,1) < 180)
    ...
    elseif (direccao(i,1) >= 180 && direccao(i,1) < 210)
    ...
    elseif (direccao(i,1) >= 210 && direccao(i,1) < 240)
    ...
    elseif (direccao(i,1) >= 240 && direccao(i,1) < 270)
    ...
    elseif (direccao(i,1) >= 270 && direccao(i,1) < 300)
    ...
    elseif (direccao(i,1) >= 300 && direccao(i,1) < 330)
    ...
    else
        dados_360(j_360,1)= dados2(i,14);
        dados_360(j_360,2)= dados2(i,6);
        dados_360(j_360,3)= dados2(i,7);
        dados_360(j_360,4)= dados2(i,8);
        dados_360(j_360,5)= dados2(i,9);
        dados_360(j_360,6)= dados2(i,10);
        dados_360(j_360,7)= dados2(i,11);
        dados_360(j_360,8)= dados2(i,13);
        j_360= j_360+1;
    end
end
```

## Anexo F – Procedimento 3.5 para dividir a matriz dos *inputs* dum ano em 29 matrizes por cada intervalo de 0,5 m/s da velocidade do vento

```
% cálculos em função da variação da velocidade do vento no último ano

% matriz_vm= matriz de 4x52560 - dados da velocidade do vento normalizada,
dados da energia disponível no vento, dados da energia real produzida pela
TE e dados da energia teórica que a TE deveria produzir

c1= 0;
c2= 0;
c3= 0;
...
...
...
c26= 0;
c27= 0;
c0= 0;
c30= 0;

for i= 1:52560
    if matriz_vm(1,i)>= 4.75 && matriz_vm(1,i)< 5.25
        c1= c1+1;
        matriz_v1(1,c1)= matriz_vm(1,i);
        matriz_v1(2,c1)= matriz_vm(2,i);
        matriz_v1(3,c1)= matriz_vm(3,i);
        matriz_v1(4,c1)= matriz_vm(4,i);
    end
    if matriz_vm(1,i)>= 5.25 && matriz_vm(1,i)< 5.75
        c2= c2+1;
        matriz_v2(1,c2)= matriz_vm(1,i);
        matriz_v2(2,c2)= matriz_vm(2,i);
        matriz_v2(3,c2)= matriz_vm(3,i);
        matriz_v2(4,c2)= matriz_vm(4,i);
    end
    ...
    ...
    ...
    if matriz_vm(1,i)>= 17.75 && matriz_vm(1,i)< 18.25
        c27= c27+1;
        matriz_v27(1,c27)= matriz_vm(1,i);
        matriz_v27(2,c27)= matriz_vm(2,i);
        matriz_v27(3,c27)= matriz_vm(3,i);
        matriz_v27(4,c27)= matriz_vm(4,i);
    end
    if matriz_vm(1,i)>= 18.25
        c30= c30+1;
        matriz_v30(1,c30)= matriz_vm(1,i);
        matriz_v30(2,c30)= matriz_vm(2,i);
        matriz_v30(3,c30)= matriz_vm(3,i);
        matriz_v30(4,c30)= matriz_vm(4,i);
    end
    if matriz_vm(1,i)< 4.75
        c0= c0+1;
        matriz_v0(1,c0)= matriz_vm(1,i);
        matriz_v0(2,c0)= matriz_vm(2,i);
        matriz_v0(3,c0)= matriz_vm(3,i);
        matriz_v0(4,c0)= matriz_vm(4,i);
    end
end
end
```



**Anexo G – Procedimento 3.6 para dividir a matriz dos *inputs* dum ano em 52 matrizes semanais e determinar as médias e os desvios padrão semanais do desempenho da TE**

```
for ii_s= 1:52
    bb_s= 1008*ii_s+144;
    aa_s= bb_s-1007;
    % 1 semana tem 1008 amostras de 10 minutos
    % 144 porque 52560 amostras de 10 minutos correspondem a 52 semanas + 1dia
    % = 144 amostras)
    % calcular o DESEMPENHO(semana) das últimas 52 semanas
    DESEMPENHO_semana(:,ii_s)= mean(DESEMPENHO_10min(aa_s:bb_s));
    % calcular o DESEMPENHO_DP(semana) das 52 últimas semanas
    DESEMPENHO_DP_semana(:,ii_s)= std(DESEMPENHO_10min(aa_s:bb_s));
end
```

**Anexo H – Procedimento 3.8 para dividir a matriz dos *inputs* dum mês em 31 matrizes diárias e determinar as médias e os desvios padrão do desempenho diário da TE**

```
for ii_d= 1:31
    bb_d= 144*ii_d; % 1 dia tem 144 amostras de 10 minutos
    aa_d= bb_d-143;
    % calcular o DESEMPENHO(dia) dos últimos 31 dias
    DESEMPENHO_dia(:,ii_d)= mean(DESEMPENHO_10min(aa_d:bb_d));
    % calcular o DESEMPENHO_DP(dia) dos últimos 31 dias
    DESEMPENHO_DP_dia(:,ii_d)= std(DESEMPENHO_10min(aa_d:bb_d));
end
```

### Anexo I – Procedimento 3.7 para prever a variação da média e do desvio padrão do desempenho para as próximas 5 semanas

```
xx_s= [1:1:52];
xx_s2= [1:1:57];

% estudo do vector das médias semanais do DESEMPENHO da TE

% previsão através da recta de regressão - p1
p1= polyfit(xx_s,DESEMPENHO_semana,1);
% previsão através dum polinómio de 2º grau - p2
p2= polyfit(xx_s,DESEMPENHO_semana,2);
% previsão através dum polinómio de 3º grau - p3
p3= polyfit(xx_s,DESEMPENHO_semana,3);
% previsão através dum polinómio de 4º grau - p4
p4= polyfit(xx_s,DESEMPENHO_semana,4);
% previsão através dum polinómio de 5º grau - p5
p5= polyfit(xx_s,DESEMPENHO_semana,5);

% calcular os pontos discriminados xx_s2 da média do DESEMPENHO das últimas
% 52 semanas e próximas 5 semanas
DESEMPENHO_semanal_1= polyval(p1,xx_s2);
DESEMPENHO_semanal_2= polyval(p2,xx_s2);
DESEMPENHO_semanal_3= polyval(p3,xx_s2);
DESEMPENHO_semanal_4= polyval(p4,xx_s2);
DESEMPENHO_semanal_5= polyval(p5,xx_s2);

% estudo do vector dos desvios padrão semanais do DESEMPENHO da TE
% previsão através da recta de regressão - p1_dp
p1_dp= polyfit(xx_s, DESEMPENHO_DP(semána),1);
% previsão através dum polinómio de 2º grau - p2_dp
p2_dp= polyfit(xx_s, DESEMPENHO_DP(semána),2);
% previsão através dum polinómio de 3º grau - p3_dp
p3_dp= polyfit(xx_s, DESEMPENHO_DP(semána),3);
% previsão através dum polinómio de 4º grau - p4_dp
p4_dp= polyfit(xx_s, DESEMPENHO_DP(semána),4);
% previsão através dum polinómio de 5º grau - p5_dp
p5_dp= polyfit(xx_s, DESEMPENHO_DP(semána),5);

% calcular os pontos discriminados xx_s2 do desvio padrão do DESEMPENHO das
% últimas 52 semanas e próximas 5 semanas
DESEMPENHO_DP_semanal_1= polyval(p1_dp,xx_s2);
DESEMPENHO_DP_semanal_2= polyval(p2_dp,xx_s2);
DESEMPENHO_DP_semanal_3= polyval(p3_dp,xx_s2);
DESEMPENHO_DP_semanal_4= polyval(p4_dp,xx_s2);
DESEMPENHO_DP_semanal_5= polyval(p5_dp,xx_s2);
```

## Anexo J – Procedimento 3.9 - filtrar os dados anormais da potência real

```
DESEMPENHO = Preal - Pteorica;

% Método de filtragem alternativo - filtra os valores reais que se desviem
% muito do valor teórico previsto
% s é o tamanho de cada matriz semanal
contador= 0;
matriz_filtrada=0;

for i= 1:s
    if (DESEMPENHO(1,i)>= -50-0.20*Pteorica(1,i) && ...
        DESEMPENHO(1,i)<= 50+0.20*Pteorica(1,i))
        contador= contador+1;
        matriz_filtrada(1,contador)= Pteorica(1,i);
        matriz_filtrada(2,contador)= Preal(1,i);
    end
end
    ou
    if (Preal (1,i)>= 0.8*Pteorica(1,i) - 50 && ...
        Preal(1,i) <= 1.2 Pteorica +50
```

## Anexo L – Procedimento 3.10 – obter as 4 matrizes com os dados de cada intervalo de velocidade do vento v= 6; v= 8; v= 10; v= 12 m/s

```
% determinação dos dados de cada intervalo 0.5 m/s de velocidade do vento

c3= 0;
c7= 0;
c11= 0;
c15= 0;

matriz_v3= 0; % v= 6 m/s
matriz_v7= 0; % v= 8 m/s
matriz_v11= 0; % v= 10 m/s
matriz_v15= 0; % v= 12 m/s

for i= 1:ss
    if matriz_vm(1,i)>= 5.75 && matriz_vm(1,i)< 6.25
        c3= c3+1;
        matriz_v3(1,c3)= matriz_vm(2,i);
        matriz_v3(2,c3)= matriz_vm(1,i);
    end
    if matriz_vm(1,i)>= 7.75 && matriz_vm(1,i)< 8.25
        c7= c7+1;
        matriz_v7(1,c7)= matriz_vm(2,i);
        matriz_v7(2,c7)= matriz_vm(1,i);
    end
    if matriz_vm(1,i)>= 9.75 && matriz_vm(1,i)< 10.25
        c11= c11+1;
        matriz_v11(1,c11)= matriz_vm(2,i);
        matriz_v11(2,c11)= matriz_vm(1,i);
    end
    if matriz_vm(1,i)>= 11.75 && matriz_vm(1,i)< 12.25
        c15= c15+1;
        matriz_v15(1,c15)= matriz_vm(2,i);
        matriz_v15(2,c15)= matriz_vm(1,i);
    end
end
end
```

**Anexo M – Ficheiro das características e da curva de potência de referência da TE Nordex\_2300\_90\_80\_1\_015 ( $\rho_{\text{ref}} = 1,015 \text{ kg/m}^3$ )**

2300  
90  
80  
4  
15  
25  
0  
0  
0  
15  
143  
278  
464  
712  
1014  
1342  
1654  
1909  
2097  
2231  
2300  
2300  
2300  
2300  
2300  
2300  
2300  
2300  
2300  
2300  
2300  
0  
0  
0  
0  
0

Linha 1 - Potência nominal;

Linha 2 - Diâmetro do rotor;

Linha 3 - Altura do rotor;

Linha 4 - Velocidade de arranque ( $V_{\text{cut\_in}}$ );

Linha 5 - Velocidade nominal ( $V_{\text{Nom}}$ );

Linha 6 - Velocidade de corte ( $V_{\text{cut\_out}}$ );

Linha 7 - Potência da turbina para a velocidade do vento igual a 1 m/s;

Linha 8 - Potência da turbina para a velocidade do vento igual a 2 m/s;

Linha 9 - Potência da turbina para a velocidade do vento igual a 3 m/s;

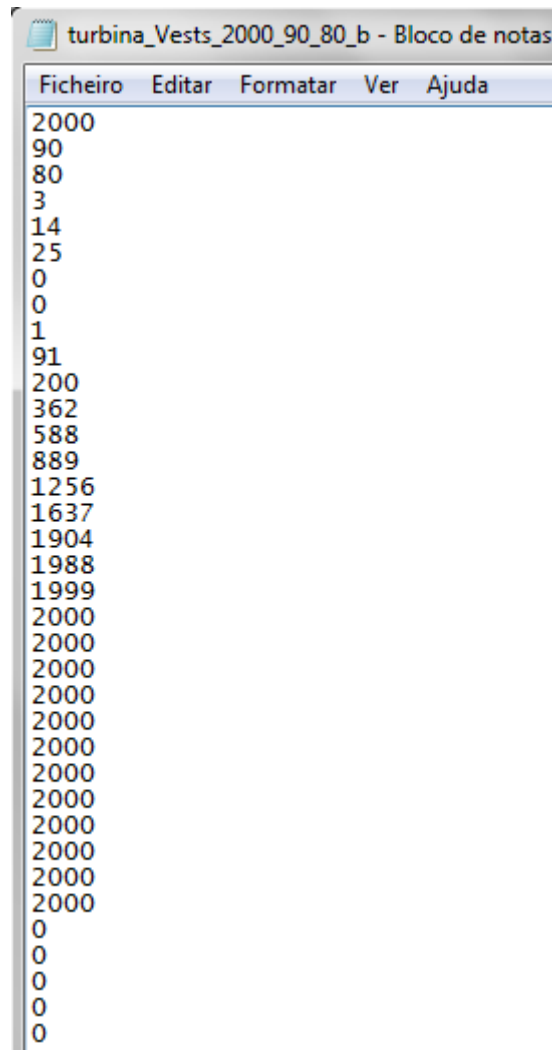
...

...

Linha 37 - Potência da turbina para a velocidade do vento igual a 29 m/s;

Linha 38 - Potência da turbina para a velocidade do vento igual a 30 m/s;

Ficheiro das características da turbina\_Vestas\_2000\_90\_80 ( $\rho_{\text{ref}} = 1,225 \text{ kg/m}^3$ )



Os ficheiros das características da turbina é formado por:

1. Potência nominal;
2. Diâmetro do rotor;
3. Altura do rotor;
4. Velocidade de arranque ( $V_{\text{cut\_in}}$ );
5. Velocidade nominal ( $V_{\text{Nom}}$ );
6. Velocidade de corte ( $V_{\text{cut\_out}}$ );
7. Potência da turbina para a velocidade do vento igual a 1 m/s;
8. Potência da turbina para a velocidade do vento igual a 2 m/s;
9. Potência da turbina para a velocidade do vento igual a 3 m/s;
10. ...
11. ...
35. Potência da turbina para a velocidade do vento igual a 29 m/s;
36. Potência da turbina para a velocidade do vento igual a 30 m/s;

## Anexo N – Tabela dos resultados anuais de cada TE do PE1 usando a metodologia 2

	PE1- TE1	PE1- TE1	PE1- TE1	PE1- TE1	PE1- TE2	PE1- TE2	PE1- TE2	PE1- TE2	PE1- TE3	PE1- TE3	PE1- TE3	PE1- TE3	PE1- TE4	PE1- TE4	PE1- TE4	PE1- TE4	PE1- TE5	PE1- TE5	PE1- TE5	PE1- TE5
Ano	2008	2009	2010	2011	2008	2009	2010	2011	2008	2009	2010	2011	2008	2009	2010	2011	2008	2009	2010	2011
A (m <sup>2</sup> )	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	<b>6362</b>	<b>6362</b>
Factor de escala anual do vento não normalizada- c(m/s)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Factor de forma anual do vento não normalizada- k	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Velocidade média anual vento não normalizada- (m/s)	6.5	6.9	7.1	6.5	6.6	6.9	7.0	6.5	6.4	7.0	6.9	6.4	6.6	6.8	7.0	6.4	6.4	6.5	<b>6.6</b>	<b>6.1</b>
Factor de forma anual do vento norm - k	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Factor de escala anual do vento norm - c(m/s)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V <sub>n(ano)</sub> (m/s)	6.5	6.9	7.1	6.4	6.6	6.9	7.0	6.5	6.4	6.9	6.9	6.5	6.6	6.8	6.9	6.3	6.4	6.6	<b>6.6</b>	<b>6.1</b>
Temperatura média anual (°C)	11.4	12.2	11.8	12.9	11.4	12.1	11.8	12.9	11.1	12.3	12.2	13.1	11.5	12.3	11.9	13.1	11.4	12.2	<b>11.7</b>	<b>12.8</b>
Pressão média anual (mbar)	898.3	896.9	892.5	897.2	897.5	896.5	892.6	899.2	897.1	896.2	892.6	966.5	896.2	895.3	892.3	897.2	896.3	895.3	<b>892.2</b>	<b>897.3</b>
ρ <sub>(ano)</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1.100	1.096	1.092	1.093	1.099	1.095	1.092	1.096	1.100	1.094	1.090	1.177	1.097	1.093	1.091	1.093	1.097	1.094	<b>1.092</b>	<b>1.094</b>
EV <sub>n(ano)</sub> normalizada (MWh/ano)	<b>18031</b>	<b>20575</b>	<b>22079</b>	<b>16750</b>	<b>19338</b>	<b>22031</b>	<b>22496</b>	<b>17734</b>	<b>17016</b>	<b>20557</b>	<b>20470</b>	<b>19051</b>	<b>18568</b>	<b>19798</b>	<b>21513</b>	<b>16725</b>	<b>17028</b>	<b>17575</b>	<b>18747</b>	<b>14525</b>
EV <sub>n(ano)</sub> não normalizada(MWh/ano)	17917	20531	22041	16727	19037	21768	22255	17549	17052	20719	20652	17435	18651	19992	21714	16885	16802	17434	<b>18594</b>	<b>14402</b>
Er <sub>(ano)</sub> (MWh/ano)	<b>5139</b>	<b>5502</b>	<b>5777</b>	<b>4839</b>	<b>5278</b>	<b>5170</b>	<b>5668</b>	<b>4909</b>	<b>4985</b>	<b>5173</b>	<b>5202</b>	<b>4194</b>	<b>5205</b>	<b>5152</b>	<b>5448</b>	<b>4730</b>	<b>4933</b>	<b>5214</b>	<b>5296</b>	<b>4504</b>
Et <sub>(ano)</sub> normalizada (MWh/ano)	<b>5641</b>	<b>6022</b>	<b>6472</b>	<b>5367</b>	<b>5765</b>	<b>6136</b>	<b>6449</b>	<b>5503</b>	<b>5433</b>	<b>6177</b>	<b>6119</b>	<b>5481</b>	<b>5801</b>	<b>6070</b>	<b>6327</b>	<b>5295</b>	<b>5399</b>	<b>5549</b>	<b>5750</b>	<b>4802</b>
Et <sub>(ano)</sub> não normalizada(MWh/ano)	5634	6029	6482	5377	5727	6112	6425	5479	5455	6224	6164	5252	5835	6118	6375	5343	5362	5524	<b>5726</b>	<b>4782</b>
DES <sub>energia(ano)</sub> normaliza(MWh/ano)	<b>-502</b>	<b>-519</b>	<b>-695</b>	<b>-528</b>	<b>-487</b>	<b>-966</b>	<b>-781</b>	<b>-594</b>	<b>-448</b>	<b>-1003</b>	<b>-916</b>	<b>-1287</b>	<b>-595</b>	<b>-918</b>	<b>-879</b>	<b>-566</b>	<b>-466</b>	<b>-335</b>	<b>-454</b>	<b>-298</b>
DES <sub>energia(ano)</sub> não normalizada(MWh/ano)	-495	-526	-705	-538	-449	-942	-757	-569	-470	-1050	-962	-1058	-629	-966	-927	-614	-429	-310	<b>-430</b>	<b>-278</b>
η <sub>(ano)</sub> normalizada (%)	<b>91</b>	<b>91</b>	<b>89</b>	<b>90</b>	<b>92</b>	<b>84</b>	<b>88</b>	<b>89</b>	<b>92</b>	<b>84</b>	<b>85</b>	<b>77</b>	<b>90</b>	<b>85</b>	<b>86</b>	<b>89</b>	<b>91</b>	<b>94</b>	<b>92</b>	<b>94</b>
η <sub>(ano)</sub> não normalizada(%)	91	91	89	90	92	85	88	90	91	83	84	80	89	84	85	89	92	94	<b>92</b>	<b>94</b>
REND <sub>(ano)</sub> normalizada (%)	<b>29</b>	<b>27</b>	<b>26</b>	<b>29</b>	<b>27</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>22</b>	<b>28</b>	<b>26</b>	<b>25</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>28</b>	<b>31</b>
REND <sub>(ano)</sub> não normalizada(%)	29	27	26	29	28	24	25	28	29	25	25	24	28	26	25	28	29	30	<b>28</b>	<b>31</b>
FU <sub>(ano)</sub> normalizada (horas)	<b>2234</b>	<b>2392</b>	<b>2512</b>	<b>2104</b>	<b>2295</b>	<b>2248</b>	<b>2464</b>	<b>2134</b>	<b>2167</b>	<b>2249</b>	<b>2262</b>	<b>1823</b>	<b>2263</b>	<b>2240</b>	<b>2369</b>	<b>2056</b>	<b>2145</b>	<b>2267</b>	<b>2303</b>	<b>1958</b>
FU <sub>(ano)</sub> normalizada (%)	<b>25.5</b>	<b>27.3</b>	<b>28.7</b>	<b>24.0</b>	<b>26.2</b>	<b>25.7</b>	<b>28.1</b>	<b>24.4</b>	<b>24.7</b>	<b>25.7</b>	<b>25.8</b>	<b>20.8</b>	<b>25.8</b>	<b>25.6</b>	<b>27.0</b>	<b>23.5</b>	<b>24.5</b>	<b>25.9</b>	<b>26.3</b>	<b>22.4</b>
PROD <sub>(ano)</sub> normalizada (kWh/m <sup>2</sup> )	<b>808</b>	<b>865</b>	<b>908</b>	<b>761</b>	<b>830</b>	<b>813</b>	<b>891</b>	<b>772</b>	<b>784</b>	<b>813</b>	<b>818</b>	<b>659</b>	<b>818</b>	<b>810</b>	<b>856</b>	<b>743</b>	<b>775</b>	<b>820</b>	<b>833</b>	<b>708</b>
DES <sub>(hora)</sub> normalizada (kW)	<b>-57.3</b>	<b>-59.3</b>	<b>-79.3</b>	<b>-60.3</b>	<b>-55.5</b>	<b>-110.3</b>	<b>-89.1</b>	<b>-67.8</b>	<b>-51.1</b>	<b>-114.5</b>	<b>-104.6</b>	<b>-146.9</b>	<b>-68.0</b>	<b>-104.8</b>	<b>-100.3</b>	<b>-64.6</b>	<b>-53.2</b>	<b>-38.3</b>	<b>-51.8</b>	<b>-34.0</b>
DES <sub>(hora)</sub> não normalizada(kW)	-56.5	-60.1	-80.5	-61.4	-51.2	-107.5	-86.4	-65.0	-53.7	-119.9	-109.8	-120.8	-71.8	-110.3	-105.8	-70.1	-49.0	-35.4	<b>-49.1</b>	<b>-31.7</b>

## Anexo O – Tabela dos resultados anuais de cada TE do PE2 usando a metodologia 2

	PE2- TE1	PE2- TE1	PE2- TE1	PE2- TE1	PE2- TE2	PE2- TE2	PE2- TE2	PE2- TE2	PE2- TE3	PE2- TE3	PE2- TE3	PE2- TE3	PE2- TE4	PE2- TE4	PE2- TE4	PE2- TE4
Ano	2008	2009	2010	2011	2008	2009	2010	2011	2008	2009	2010	2011	2008	2009	2010	2011
A (m²)	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362
Factor de escala anual do vento não normalizada- c(m/s)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Factor de forma anual do vento não normalizada- k	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Velocidade média anual vento não normalizada- (m/s)	6.5	7.1	7.3	6.7	7.1	7.7	7.6	7.1	6.9	7.2	7.6	7.0	7.0	7.2	7.5	6.5
Factor de forma anual do vento norm - k	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Factor de escala anual do vento norm - c(m/s)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Vn <sub>(ano)</sub> (m/s)	6.4	7.1	7.3	6.6	7.1	7.6	7.5	7.0	6.8	7.1	7.5	6.9	6.9	7.1	7.4	6.5
Temperatura média anual (°C)	10.6	11.5	11.1	12.2	10.9	11.4	11.6	12.3	10.7	11.5	11.4	12.2	10.7	11.4	11.1	12.1
Pressão média anual (mbar)	796.6	798.1	799.7	797.0	797.2	796.1	797.8	796.7	797.0	797.4	799.7	795.4	796.5	796.2	800.2	797.8
ρ <sub>(ano)</sub> (kg/m³)	0.978	0.977	0.981	0.973	0.978	0.975	0.977	0.972	0.978	0.976	0.980	0.971	0.978	0.975	0.982	0.975
EVn <sub>(ano)</sub> normalizada (MWh/ano)	18793	22534	26089	20639	21134	35015	28227	23879	19416	24346	30928	22634	19768	24246	28089	18917
EVn <sub>(ano)</sub> não normalizada(MWh/ano)	19189	23061	26618	21128	21604	35581	28839	24411	19833	24909	31581	23196	20190	24795	28639	19370
Er <sub>(ano)</sub> (MWh/ano)	5877	6300	6310	5462	6038	5321	6557	5401	5741	6058	6323	5361	5702	6168	6549	5115
Et <sub>(ano)</sub> normalizada (MWh/ano)	5333	5965	6208	5252	5983	6458	6524	5754	5663	6067	6609	5563	5768	6053	6438	5007
Et <sub>(ano)</sub> não normalizada(MWh/ano)	5411	6057	6287	5350	6077	6554	6611	5860	5751	6157	6690	5663	5861	6142	6516	5103
DES <sub>energia(ano)</sub> normaliza(MWh/ano)	544	335	102	210	55	-1137	33	-352	78	-8	-286	-201	-66	115	111	108
DES <sub>energia(ano)</sub> não normalizada(MWh/ano)	467	244	22	112	-39	-1234	-54	-459	-10	-99	-367	-302	-158	26	33	13
η <sub>(ano)</sub> normalizada (%)	110	106	102	104	101	82	101	94	101	100	96	96	99	102	102	102
η <sub>(ano)</sub> não normalizada(%)	109	104	100	102	99	81	99	92	100	98	95	95	97	100	101	100
REND <sub>(ano)</sub> normalizada (%)	31	28	24	26	29	15	23	23	30	25	20	24	29	25	23	27
REND <sub>(ano)</sub> não normalizada(%)	31	27	24	26	28	15	23	22	29	24	20	23	28	25	23	26
FU <sub>(ano)</sub> normalizada (horas)	2555	2739	2743	2375	2625	2313	2851	2348	2496	2634	2749	2331	2479	2682	2847	2224
FU <sub>(ano)</sub> normalizada (%)	29.2	31.3	31.3	27.1	30.0	26.4	32.5	26.8	28.5	30.1	31.4	26.6	28.3	30.6	32.5	25.4
PROD <sub>(ano)</sub> normalizada (kWh/m²)	924	990	992	859	949	836	1031	849	902	952	994	843	896	970	1029	804
DES <sub>(hora)</sub> normalizada (kW)	62.2	38.3	11.6	24.0	6.3	-129.8	3.7	-40.2	8.9	-0.9	-32.7	-23.0	-7.5	13.1	12.7	12.3
DES <sub>(hora)</sub> não normalizada(kW)	53.3	27.8	2.6	12.8	-4.5	-140.8	-6.2	-52.4	-1.2	-11.3	-41.9	-34.5	-18.1	2.9	3.8	1.4

	PE2- TE5	PE2- TE5	PE2- TE5	PE2- TE5	PE2- TE6	PE2- TE6	PE2- TE6	PE2- TE6	PE2- TE7	PE2- TE7	PE2- TE7	PE2- TE7	PE2- TE8	PE2- TE8	PE2- TE8	PE2- TE8
Ano	2008	2009	2010	2011	2008	2009	2010	2011	2008	2009	2010	2011	2008	2009	2010	2011
A (m <sup>2</sup> )	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362	6362
Factor de escala anual do vento não normalizada- c(m/s)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Factor de forma anual do vento não normalizada- k	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Velocidade média anual vento não normalizada- (m/s)	6.6	7.0	6.8	6.2	6.3	6.7	6.8	6.2	6.4	7.1	7.0	6.4	6.6	7.0	7.1	6.2
Factor de forma anual do vento norm - k	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Factor de escala anual do vento norm - c(m/s)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Vn <sub>(ano)</sub> (m/s)	6.5	7.0	6.8	6.2	6.3	6.7	6.7	6.1	6.3	7.0	7.0	6.4	6.6	6.9	7.1	6.1
Temperatura média anual (°C)	10.8	11.5	11.5	12.4	11.0	11.8	11.6	12.6	10.8	11.6	11.5	12.4	10.9	11.7	11.5	12.5
Pressão média anual (mbar)	796.5	798.2	799.6	797.0	797.1	798.7	800.0	797.2	795.9	798.4	799.8	796.6	796.7	798.7	797.1	796.3
ρ <sub>(ano)</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	0.977	0.977	0.980	0.973	0.978	0.977	0.979	0.972	0.977	0.977	0.980	0.972	0.977	0.977	0.976	0.972
EVn <sub>(ano)</sub> normalizada (MWh/ano)	16189	22577	21493	16858	14679	18518	19851	14971	16221	21711	21860	16296	16373	20845	22625	17042
EVn <sub>(ano)</sub> não normalizada(MWh/ano)	16544	23087	21953	17287	14993	18949	20277	15351	16561	22228	22329	16721	16729	21337	23116	17476
Er <sub>(ano)</sub> (MWh/ano)	5055	4561	5288	4834	4972	5343	5439	4638	4961	5500	5552	4693	4896	5430	5432	4685
Et <sub>(ano)</sub> normalizada (MWh/ano)	5030	5608	5471	4613	4682	5151	5241	4410	4900	5823	5752	4845	5108	5610	5841	4721
Et <sub>(ano)</sub> não normalizada(MWh/ano)	5119	5701	5545	4702	4765	5238	5317	4503	4982	5920	5838	4947	5200	5706	5929	4813
DES <sub>energia(ano)</sub> normaliza(MWh/ano)	25	-1047	-183	220	290	192	198	228	61	-323	-200	-153	-212	-180	-410	-36
DES <sub>energia(ano)</sub> não normalizada(MWh/ano)	-64	-1139	-257	131	207	105	121	135	-21	-420	-286	-255	-304	-276	-497	-128
η <sub>(ano)</sub> normalizada (%)	100	81	97	105	106	104	104	105	101	94	97	97	96	97	93	99
η <sub>(ano)</sub> não normalizada(%)	99	80	95	103	104	102	102	103	100	93	95	95	94	95	92	97
REND <sub>(ano)</sub> normalizada (%)	31	20	25	29	34	29	27	31	31	25	25	29	30	26	24	27
REND <sub>(ano)</sub> não normalizada(%)	31	20	24	28	33	28	27	30	30	25	25	28	29	25	23	27
FU <sub>(ano)</sub> normalizada (horas)	2198	1983	2299	2102	2162	2323	2365	2017	2157	2391	2414	2040	2129	2361	2362	2037
FU <sub>(ano)</sub> normalizada (%)	25.1	22.6	26.2	24.0	24.7	26.5	27.0	23.0	24.6	27.3	27.6	23.3	24.3	26.9	27.0	23.3
PROD <sub>(ano)</sub> normalizada (kWh/m <sup>2</sup> )	795	717	831	760	782	840	855	729	780	865	873	738	770	853	854	736
DES <sub>(hora)</sub> normalizada (kW)	2.8	-119.5	-20.9	25.2	33.1	21.9	22.6	26.1	7.0	-36.9	-22.8	-17.4	-24.2	-20.6	-46.8	-4.1
DES <sub>(hora)</sub> não normalizada(kW)	-7.3	-130.1	-29.3	15.0	23.6	11.9	13.8	15.4	-2.4	-48.0	-32.6	-29.1	-34.7	-31.5	-56.8	-14.6



**Anexo P – Registo das intervenções efetuadas às oito TEs do PE2 de 01/01/2008 a 31/05/2012**

<b>Tipo_Intervenção</b>	<b>TE</b>	<b>Descrição da intervenção</b>	<b>Início</b>	<b>Fim</b>
M_preventiva	WTG 4	Slip Ring replacement	03-01-2008	03-01-2008
M_preventiva	WTG 5	Maintenance Type III	07-01-2008	08-01-2008
M_preventiva	WTG 5	Maintenance Type III	09-01-2008	09-01-2008
M_preventiva	WTG 5	Maintenance Type III	10-01-2008	10-01-2008
M_preventiva	WTG 5	Maintenance Type III	14-01-2008	14-01-2008
M_preventiva	WTG 6	Maintenance Type III	14-01-2008	14-01-2008
M_preventiva	WTG 3	Pitch 2 batteries replacement	14-01-2008	14-01-2008
M_preventiva	WTG 7	Slip Ring replacement	15-01-2008	16-01-2008
M_preventiva	WTG 8	Slip Ring replacement	15-01-2008	16-01-2008
M_preventiva	WTG 6	Maintenance Type III	16-01-2008	17-01-2008
M_preventiva	WTG 6	Maintenance Type III	18-01-2008	18-01-2008
M_preventiva	WTG 7	Maintenance Type III	28-01-2008	29-01-2008
M_preventiva	WTG 8	Maintenance Type III	29-01-2008	31-01-2008
M_preventiva	WTG 6	Generator alignment	01-02-2008	01-02-2008
M_preventiva	WTG 5	Generator alignment	01-02-2008	01-02-2008
M_preventiva	WTG 2	Slip Ring replacement	14-02-2008	14-02-2008
M_preventiva	WTG 7	Slip Ring replacement	18-02-2008	18-02-2008
Inspeção	WTG 1 to 4	Blades	28-03-2008	31-03-2008
Inspeção	WTGs 2, 5, 6, 7 and 8	Blades	01-04-2008	11-04-2008
M_preventiva	WTG 2	Oil filter replacement	12-04-2008	12-04-2008
M_corretiva	WTG 5	Control board replacement	23-04-2008	23-04-2008
M_preventiva	WTG 3	Cleaned and adjusted the yaw motor brakes sensors	29-04-2008	29-04-2008
M_corretiva	WTG 5	Pitch 2 inverter replacement	30-04-2008	30-04-2008
M_corretiva	WTG 5	Reprogram the control board	05-05-2008	05-05-2008
M_preventiva	WTG 5	Type II	05-05-2008	06-05-2008
M_preventiva	WTG 1	Type II	07-05-2008	07-05-2008
M_preventiva	WTG 2	Type II	09-05-2008	12-05-2008
M_preventiva	WTG 3	Type II	13-05-2008	14-05-2008
M_preventiva	WTG 4	Type II	15-05-2008	16-05-2008
M_preventiva	WTG 6	Type II	19-05-2008	20-05-2008
M_preventiva	WTG 7	Type II	20-05-2008	21-05-2008
M_preventiva	WTG 8	Type II	21-05-2008	22-05-2008
M_corretiva	WTG 8	Pitch 2 inverter replacement	23-05-2008	23-05-2008
M_corretiva	WTG 1	Generator brushes replacement	02-06-2008	02-06-2008
M_preventiva	WTG 2	Generator alignment	03-06-2008	03-06-2008
M_corretiva	WTG 3	Change generator bearing	06-06-2008	06-06-2008
M_corretiva	WTG 4	Pitch1 inverter replacement	21-08-2008	21-08-2008
M_corretiva	WTG 6	Pitch3 inverter replacement	21-08-2008	21-08-2008
M_corretiva	WTG 7	Pitch3 inverter replacement	25-08-2008	25-08-2008
M_corretiva	WTG 7	Pitch 3 motor encoder replacement	25-08-2008	25-08-2008
M_corretiva	WTG 3	Pitch3 inverter replacement	26-08-2008	26-08-2008
M_corretiva	WTG 5	Phase module replacement	04-09-2008	04-09-2008
M_corretiva	WTG 8	Pitch 1 inverter replacement	01-10-2008	01-10-2008
M_preventiva	WTG 4	Slip Ring replacement	07-10-2008	07-10-2008
M_preventiva	WTG 1	Yaw motor brakes sensors cleaning and adjustment	09-10-2008	09-10-2008
M_preventiva	WTG 3	Slip Ring replacement	14-11-2008	15-11-2008
M_preventiva	WTG 3	Gearbox Oil and filter change	15-11-2008	15-11-2008
M_preventiva	WTG 1	Gearbox Oil and filter change	17-11-2008	17-11-2008
M_preventiva	WTG 4	Gearbox Oil and filter change	17-11-2008	17-11-2008
M_preventiva	WTG 8	Type III	25-11-2008	25-11-2008
M_preventiva	WTG 8	Type III	26-11-2008	26-11-2008
M_corretiva	WTG 8	Oil pump and motor replacement	27-11-2008	27-11-2008
M_preventiva	WTG 8	Type III	27-11-2008	27-11-2008
M_corretiva	WTG 1	Yaw redundancy replacement	30-11-2008	30-11-2008
M_corretiva	WTG 6	Pitch contactor	02-12-2008	02-12-2008
M_preventiva	WTG 8	Type III	04-12-2008	04-12-2008
M_preventiva	WTG 5	Type III	05-12-2008	05-12-2008
M_preventiva	WTG 5	Type III	08-12-2008	08-12-2008
M_preventiva	WTG 5	Type III	09-12-2008	09-12-2008
M_preventiva	WTG 5	Type III	10-12-2008	10-12-2008
M_preventiva	WTG 5	Type III	11-12-2008	11-12-2008
M_preventiva	WTG 1	Type III	12-12-2008	12-12-2008
M_preventiva	WTG 1	Type III	15-12-2008	15-12-2008
M_preventiva	WTG 1	Type III	16-12-2008	16-12-2008
M_preventiva	WTG 1	Type III	17-12-2008	17-12-2008
M_preventiva	WTG 4	Type III	17-12-2008	17-12-2008
M_corretiva	WTG 4	Pitch 1 and 3 inverters replacement	23-12-2008	23-12-2008
M_preventiva	WTG 4	Type III	07-01-2009	07-01-2009
M_preventiva	WTG 4	Type III	08-01-2009	08-01-2009
M_preventiva	WTG 2	Type III	15-01-2009	15-01-2009
M_preventiva	WTG 2	Type III	16-01-2009	16-01-2009
Inspeção	WTG 2	Gearbox inspection	16-01-2009	16-01-2009
Inspeção	WTG 5	Gearbox inspection	16-01-2009	16-01-2009
M_preventiva	WTG 2	Type III	19-01-2009	19-01-2009
Inspeção	Command Building	Pest control	22-01-2009	22-01-2009
M_preventiva	WTG 3	Type III	26-01-2009	26-01-2009
M_preventiva	WTG 3	Type III	27-01-2009	27-01-2009
M_preventiva	WTG 6	Slip-ring replacement	30-01-2009	30-01-2009
M_preventiva	WTG 3	Type III	02-02-2009	02-02-2009
M_preventiva	WTG 4	Slip-ring cleaning	05-02-2009	05-02-2009
M_corretiva	WTG 2	Gearbox replacement	05-02-2009	20-02-2009

Tipo_Intervenção	TE	Descrição da intervenção	Início	Fim
Inspeção	WTG 3	Gearbox inspection	10-02-2009	10-02-2009
Inspeção	WTG 6	Gearbox inspection	12-02-2009	12-02-2009
M_preventiva	WTG 6	Type III	12-02-2009	12-02-2009
Inspeção	WTG 3	Gearbox inspection	13-02-2009	13-02-2009
Inspeção	WTG 1	Gearbox inspection	16-02-2009	16-02-2009
M_preventiva	WTG 6	Type III	16-02-2009	16-02-2009
Inspeção	WTG 4	Gearbox inspection	16-02-2009	16-02-2009
M_corretiva	WTG 5	Gearbox replacement	14-01-2009	20-02-2009
M_preventiva	WTG 6	Type III	17-02-2009	17-02-2009
M_preventiva	WTG 7	Type III	18-02-2009	18-02-2009
Inspeção	WTG 7	Gearbox inspection	18-02-2009	18-02-2009
M_preventiva	WTG 7	Type III	19-02-2009	19-02-2009
Inspeção	WTG 8	Gearbox inspection	19-02-2009	19-02-2009
M_corretiva	WTG 2	Pitch 2 inverter replacement	22-02-2009	22-02-2009
M_preventiva	WTG 5	Yaw motor brakes cleaning	22-02-2009	22-02-2009
M_preventiva	WTG 2	Oil leakage check	24-02-2009	24-02-2009
M_preventiva	WTG 5	Generator alignment	10-03-2009	10-03-2009
M_preventiva	WTG 2	Generator alignment	11-03-2009	11-03-2009
M_preventiva	WTG 4	Generator alignment	12-03-2009	12-03-2009
M_preventiva	WTG 3	Generator alignment	16-03-2009	16-03-2009
M_preventiva	WTG 7	Generator alignment	19-03-2009	19-03-2009
M_preventiva	WTG 8	Generator alignment	20-03-2009	20-03-2009
M_preventiva	WTG 6	Generator alignment	23-03-2009	24-03-2009
M_preventiva	WTG 1	Generator alignment	26-03-2009	26-03-2009
M_melhoria	WTG 2	CMS installation	07-04-2009	08-04-2009
M_corretiva	WTG 8	Pitch 3 inverter replacement	13-04-2009	13-04-2009
M_corretiva	WTG 7	Change the yaw motors	01-05-2009	01-05-2009
M_melhoria	WTG 5	CMS installation	06-05-2009	06-05-2009
Inspeção	WTG 5	Check the tightness of the gearbox	08-05-2009	11-05-2009
Inspeção	WTG 2	Check the tightness of the gearbox	11-05-2009	11-05-2009
M_melhoria	WTG 3	CMS installation	12-05-2009	12-05-2009
M_melhoria	WTG 1	CMS installation	13-05-2009	13-05-2009
M_melhoria	WTG 4	CMS installation	19-05-2009	19-05-2009
Inspeção	WTG 7	Blades inspection	28-05-2009	28-05-2009
M_preventiva	WTG 1	Yaw motor brake sensor adjust	29-05-2009	29-05-2009
M_melhoria	WTG 6	CMS installation	02-06-2009	02-06-2009
M_preventiva	WTG 8	Maintenance type II	15-06-2009	16-06-2009
M_melhoria	WTG 7	CMS installation	17-06-2009	17-06-2009
M_melhoria	WTG 8	CMS installation	18-06-2009	18-06-2009
M_corretiva	WTG 2	Pitch 1 inverter replacement	18-06-2009	18-06-2009
M_preventiva	WTG 1	Maintenance type II	19-06-2009	22-06-2009
M_melhoria	WTG 1	CMS commissioning	23-06-2009	23-06-2009
M_melhoria	WTG 2	CMS commissioning	23-06-2009	23-06-2009
M_preventiva	WTG 1	Inside blades cleaning	24-06-2009	24-06-2009
M_preventiva	WTG 2	Maintenance type II	25-06-2009	25-06-2009
M_preventiva	WTG 3	Maintenance type II	30-06-2009	01-07-2009
M_preventiva	WTG 1	Inside blades cleaning	02-07-2009	02-07-2009
M_preventiva	WTG 4	Maintenance type II	06-07-2009	08-07-2009
M_preventiva	WTG 5	Maintenance type II	09-07-2009	14-07-2009
M_melhoria	WTG 3	Pitch inverter program	13-07-2009	13-07-2009
M_melhoria	WTG 8	CMS commissioning	16-07-2009	16-07-2009
M_preventiva	WTG 6	Maintenance type II	17-07-2009	21-07-2009
M_melhoria	WTG 3	CMS commissioning	24-07-2009	24-07-2009
M_melhoria	WTG 4	CMS commissioning	27-07-2009	27-07-2009
M_melhoria	WTG 6	CMS commissioning	28-07-2009	28-07-2009
M_melhoria	WTG 7	CMS commissioning	28-07-2009	28-07-2009
M_corretiva	WTG 2	Pitch 2 encoder replacement	28-07-2009	28-07-2009
M_preventiva	WTG 7	Maintenance type II	29-07-2009	31-07-2009
M_preventiva	Substation	Maintenance of electrical equipment	18-08-2009	20-08-2009
M_corretiva	WTG 1	Yaw motor brake sensor replacement	19-08-2009	19-08-2009
M_preventiva	WTG 1	Inside blades cleaning	21-08-2009	21-08-2009
M_corretiva	WTG 1	Pitch 3 inverter replacement	29-08-2009	29-08-2009
M_corretiva	WTG 8	Pitch 1 inverter replacement	31-08-2009	31-08-2009
M_corretiva	WTG 3	Pitch 1 motor brake replacement	22-09-2009	22-09-2009
M_corretiva	WTG 3	Pitch 2 inverter replacement	22-09-2009	22-09-2009
M_corretiva	WTG 8	Yaw redundancy replacement	07-10-2009	07-10-2009
M_corretiva	WTG 7	Yaw redundancy replacement	07-10-2009	07-10-2009
M_preventiva	WTG 1	Type III	27-10-2009	30-10-2009
M_preventiva	WTG 2	Type III	02-11-2009	04-11-2009
M_preventiva	WTG 3	Type III	04-11-2009	11-11-2009
M_preventiva	WTG 4	Type III	11-11-2009	08-12-2009
M_preventiva	WTG 4	Oil chang	04-12-2009	04-12-2009
M_preventiva	WTG 5	Type III	08-12-2009	14-12-2009
M_preventiva	WTG 6	Type III	18-12-2009	18-01-2010
M_preventiva	WTG 6	Type III	18-12-2009	18-01-2010
M_preventiva	WTG 2	Generator rotation sensor adjustment	28-12-2009	28-12-2009
M_preventiva	WTG 1	Generator alignment	06-01-2010	06-01-2010
M_preventiva	WTG 2	Generator alignment	06-01-2010	06-01-2010
M_preventiva	WTG 3	Generator alignment	06-01-2010	06-01-2010
M_preventiva	WTG 7	Type III	08-01-2010	20-01-2010
M_preventiva	WTG 8	Type III	21-01-2010	11-03-2010
M_corretiva	WTG 3	Pitch 1 inverter replacement	17-02-2010	17-02-2010
M_corretiva	WTG 6	Oil pump copling replacement	22-02-2010	22-02-2010
M_corretiva	WTG 4	Gearbox high speed bearing replacement	01-03-2010	01-03-2010
Inspeção	WTG 1	Gearbox high speed bearing	02-03-2010	02-03-2010

Tipo_Intervenção	TE	Descrição da intervenção	Início	Fim
M_corretiva	WTG 6	Gearbox high speed bearing replacement	03-03-2010	03-03-2010
M_corretiva	WTG 7	Gearbox high speed bearing replacement	04-03-2010	04-03-2010
M_preventiva	WTG 6	Gearbox oil change	04-03-2010	04-03-2010
M_corretiva	WTG 1	Gearbox high speed bearing replacement	05-03-2010	05-03-2010
M_preventiva	WTG 1	Gearbox oil change	09-03-2010	09-03-2010
Inspeção	WTG 1	Gearbox high speed bearing	09-03-2010	09-03-2010
Inspeção	WTG 4	Gearbox high speed bearing	09-03-2010	09-03-2010
Inspeção	WTG 6	Gearbox high speed bearing	09-03-2010	09-03-2010
Inspeção	WTG 7	Gearbox high speed bearing	09-03-2010	09-03-2010
M_preventiva	WTG 7	Gearbox oil change	12-03-2010	12-03-2010
M_corretiva	WTG 3	Reparar ou substituir LPC	19-03-2010	19-03-2010
M_corretiva	WTG 3	Anemometer replacement	07-04-2010	07-04-2010
M_corretiva	WTG 2	Pitch 2 encoder replacement	20-04-2010	20-04-2010
Inspeção	WTG 2	Gearbox oil leakage	28-04-2010	28-04-2010
M_preventiva	WTG 1	Type III	17-05-2010	18-05-2010
M_preventiva	WTG 2	Type III	20-05-2010	21-05-2010
M_preventiva	WTG 3	Type III	24-05-2010	25-05-2010
M_preventiva	WTG 4	Type III	26-05-2010	26-05-2010
M_corretiva	WTG 6	Pitch 1 inverter replacement	26-05-2010	26-05-2010
M_preventiva	WTG 5	Type III	27-05-2010	28-05-2010
M_preventiva	WTG 6	Type III	28-05-2010	01-06-2010
M_preventiva	WTG 7	Tipo III	02-06-2010	03-06-2010
M_preventiva	WTG 8	Tipo III	03-06-2010	04-06-2010
M_preventiva	WTG 2	Verificar/Alinhar gerador	07-06-2010	07-06-2010
M_preventiva	WTG 4	Verificar/Alinhar gerador	07-06-2010	07-06-2010
M_corretiva	WTG 2	Substituir inverter da pá 3	14-06-2010	14-06-2010
M_preventiva	WTG 3	Verificar/Alinhar gerador	16-06-2010	16-06-2010
M_preventiva	WTG 6	Verificar/Alinhar gerador	16-06-2010	16-06-2010
M_preventiva	WTG 1	Verificar/Alinhar gerador	16-06-2010	16-06-2010
Inspeção	WTG 1	Inspeccionar caixa multiplicadora	15-07-2010	19-07-2010
M_corretiva	WTG 6	Substituição do inverter da pá 1	20-07-2010	20-07-2010
M_corretiva	WTG 1	Substituir caixa multiplicadora	09-08-2010	13-08-2010
Inspeção	WTG 4	Inspeccionar gerador.	16-09-2010	16-09-2010
M_preventiva	WTG 4	Substituir óleo da caixa multiplicadora	13-10-2010	25-10-2010
M_corretiva	WTG 4	Substituir LPC	22-10-2010	22-10-2010
M_preventiva	WTG 6	Substituir óleo da caixa multiplicadora	26-10-2010	26-10-2010
M_preventiva	WTG 8	Substituir óleo da caixa multiplicadora	27-10-2010	27-10-2010
M_preventiva	WTG 1	Manutenção tipo II	11-11-2010	12-11-2010
M_preventiva	WTG 2	Manutenção tipo II	15-11-2010	15-11-2010
M_preventiva	WTG 3	Manutenção tipo II	16-11-2010	16-11-2010
M_preventiva	WTG 5	Manutenção tipo II	16-11-2010	17-11-2010
M_preventiva	WTG 4	Manutenção tipo II	16-11-2010	18-11-2010
M_preventiva	WTG 6	Manutenção tipo II	18-11-2010	19-11-2010
M_preventiva	WTG 7	Manutenção tipo II	22-11-2010	22-11-2010
M_preventiva	WTG 8	Manutenção tipo II	23-11-2010	23-11-2010
M_preventiva	WTG 6	Substituir baterias do pitch 3	01-02-2011	01-02-2011
M_corretiva	WTG 7	Reparação das pás	01-03-2011	02-03-2011
M_corretiva	WTG 8	Reparação das pás	02-03-2011	10-03-2011
Inspeção	WTG 7	Inspeção da caixa multiplicadora	21-02-2011	21-02-2011
M_preventiva	WTG 1	Substituição do disco do travão	19-02-2011	19-02-2011
M_corretiva	WTG 6	Reparação das pás	10-03-2011	17-03-2011
M_corretiva	WTG 5	Reparação das pás	18-03-2011	21-03-2011
M_corretiva	WTG 2	Reparação das pás	21-03-2011	24-03-2011
M_corretiva	WTG 6	Substituição de fonte de alimentação do pitch 2	24-03-2011	24-03-2011
M_corretiva	WTG 1	Reparação das pás	29-03-2011	31-03-2011
M_corretiva	WTG 2	Substituição do encoder do motor da pá 3	06-04-2011	06-04-2011
Inspeção	WTG 4	Inspeção endoscópica da caixa multiplicadora	08-04-2011	08-04-2011
M_corretiva	WTG 4	Problemas no Main Inverter	04-05-2011	04-05-2011
M_preventiva	WTG 8	Reaperto do "Main Bearing"	04-05-2011	04-05-2011
M_preventiva	WTG 6	Óleo da caixa multiplicadora	10-05-2011	10-05-2011
M_preventiva	WTG 3	Óleo da caixa multiplicadora	17-05-2011	17-05-2011
M_preventiva	WTG 8	Substituição das baterias de pitch 3	18-05-2011	18-05-2011
M_corretiva	WTG 3	Substituição de redundância do pitch 3	19-05-2011	20-05-2011
M_preventiva	WTG 1	Manutenção tipo III	30-05-2011	02-06-2011
M_preventiva	WTG 2	Manutenção tipo III	27-06-2011	22-07-2011
M_preventiva	WTG 3	Manutenção tipo III	28-06-2011	04-08-2011
M_preventiva	WTG 4	Manutenção tipo III	07-06-2011	29-08-2011
M_preventiva	WTG 5	Manutenção tipo III	29-06-2011	20-07-2011
M_preventiva	WTG 6	Manutenção tipo III	30-06-2011	30-06-2011
M_preventiva	WTG 7	Manutenção tipo III	06-07-2011	06-07-2011
M_preventiva	WTG 8	Manutenção tipo III	06-06-2011	08-06-2011
M_preventiva	Command Building	Manutenção eléctrica ao Ed. Comando e Subestação	16-06-2011	16-06-2011
M_preventiva	WTG 8	Manutenção eléctrica ao TP e Seccionadores	14-06-2011	14-06-2011
M_preventiva	WTG 4	Manutenção eléctrica ao TP e Seccionadores	14-06-2011	14-06-2011
M_corretiva	WTG 4	Substituição do "Main Switch"	14-06-2011	14-06-2011
M_corretiva	WTG 4	LPC avariado	24-06-2011	24-06-2011
M_preventiva	WTG 1	Manutenção eléctrica ao TP e Seccionadores	17-06-2011	17-06-2011
M_preventiva	WTG 2	Manutenção eléctrica ao TP e Seccionadores	17-06-2011	17-06-2011
M_preventiva	WTG 3	Manutenção eléctrica ao TP e Seccionadores	17-06-2011	17-06-2011
M_preventiva	Substation	Manutenção eléctrica ao regulador de tomadas	15-06-2011	15-06-2011
M_preventiva	WTG 5	Manutenção eléctrica ao TP e Seccionadores	20-06-2011	20-06-2011
M_preventiva	WTG 6	Manutenção eléctrica ao TP e Seccionadores	20-06-2011	20-06-2011
M_preventiva	WTG 7	Manutenção eléctrica ao TP e Seccionadores	20-06-2011	20-06-2011
M_corretiva	WTG 4	Reparação das pás	20-06-2011	23-06-2011
M_preventiva	WTG 8	Substituição das baterias de pitch 1	20-06-2011	20-06-2011

Tipo_Intervenção	TE	Descrição da intervenção	Início	Fim
M_melhoria	WTG 2	Retrofit nos travões dos motores de Yaw	27-06-2011	27-06-2011
M_preventiva	WTG 2	Acerto do Zero das pás	27-06-2011	27-06-2011
M_melhoria	WTG 3	Retrofit nos travões dos motores de Yaw	28-06-2011	28-06-2011
M_melhoria	WTG 1	Retrofit nos travões dos motores de Yaw	04-07-2011	04-07-2011
M_corretiva	WTG 2	Reparação das pás	08-07-2011	25-07-2011
M_melhoria	WTG 4	Retrofit nos travões dos motores de Yaw	15-07-2011	15-07-2011
M_melhoria	WTG 5	Retrofit nos travões dos motores de Yaw	18-11-2010	18-11-2010
M_melhoria	WTG 6	Retrofit nos travões dos motores de Yaw	11-03-2011	11-03-2011
M_melhoria	WTG 7	Retrofit nos travões dos motores de Yaw	01-03-2011	01-03-2011
M_melhoria	WTG 8	Retrofit nos travões dos motores de Yaw	04-03-2011	04-03-2011
M_corretiva	WTG 3	Reparação das pás	25-07-2011	28-07-2011
M_corretiva	WTG 5	Reparação das pás	09-08-2011	13-08-2011
M_corretiva	WTG 6	Reparação das pás	15-08-2011	18-08-2011
M_corretiva	WTG 7	Reparação das pás	19-08-2011	25-08-2011
M_corretiva	WTG 8	Reparação das pás	26-08-2011	07-09-2011
Inspeção	WTG 2	Inspeção endoscópica de fim de garantia da caixa multiplicadora	03-10-2011	03-10-2011
Inspeção	WTG 5	Inspeção endoscópica de fim de garantia da caixa multiplicadora	03-10-2011	03-10-2011
Inspeção	WTG 1	Inspeção endoscópica de fim de garantia da caixa multiplicadora	01-11-2011	01-11-2011
Inspeção	WTG 3	Inspeção endoscópica de fim de garantia da caixa multiplicadora	01-11-2011	01-11-2011
Inspeção	WTG 4	Inspeção endoscópica de fim de garantia da caixa multiplicadora	04-11-2011	04-11-2011
Inspeção	WTG 5	Inspeção endoscópica de fim de garantia da caixa multiplicadora	02-11-2011	02-11-2011
Inspeção	WTG 6	Inspeção endoscópica de fim de garantia da caixa multiplicadora	03-11-2011	03-11-2011
Inspeção	WTG 7	Inspeção endoscópica de fim de garantia da caixa multiplicadora	04-11-2011	04-11-2011
Inspeção	WTG 8	Inspeção endoscópica de fim de garantia da caixa multiplicadora	03-11-2011	03-11-2011
M_preventiva	WTG 4	Substituição do filtro do óleo	27-10-2011	27-10-2011
M_corretiva	WTG 6	Substituição do encoder do motor de pitch 1	27-10-2011	27-10-2011
M_preventiva	WTG 4	Substituição do filtro do óleo	27-10-2011	27-10-2011
M_preventiva	WTG 4	Substituição do óleo	28-10-2011	28-10-2011
M_preventiva	WTG 4	Substituição do filtro do óleo	04-11-2011	04-11-2011
M_corretiva	WTG 4	Substituição do encoder do gerador	07-11-2011	07-11-2011
M_corretiva	WTG 1	Caixa de yaw partida	11-11-2011	11-11-2011
M_preventiva	WTG 4	Manutenção tipo II	29-11-2011	07-12-2011
M_preventiva	WTG 7	Substituição do slip ring.	21-12-2011	21-12-2011
M_preventiva	WTG 1	Substituição das baterias do pitch 2	27-12-2011	27-12-2011
M_preventiva	WTG01	Manutenção tipo II	27-12-2011	30-01-2012
M_preventiva	WTG02	Manutenção tipo II	10-01-2012	10-01-2012
M_preventiva	WTG03	Manutenção tipo II	12-01-2012	12-01-2012
M_preventiva	WTG05	Manutenção tipo II	16-01-2012	16-01-2012
M_preventiva	WTG06	Manutenção tipo II	25-01-2012	30-01-2012
M_preventiva	WTG07	Manutenção tipo II	20-01-2012	01-02-2012
M_preventiva	WTG08	Manutenção tipo II	23-01-2012	23-01-2012
M_preventiva	WTG02	Substituição do slirpring	15-01-2012	15-01-2012
Inspeção	WTG04	Níveis de ferro e cobre elevados.	15-11-2011	20-01-2012
Inspeção	WTG04	Níveis de ferro e cromo elevados.	15-11-2011	20-01-2012
Inspeção	WTG03	Níveis de cobre e zinco elevados. O ferro aumentou ligeiramente.	12-12-2011	20-01-2012
Inspeção	WTG02	Resultado da amostra OK	12-12-2011	20-01-2012
M_preventiva	WTG04	Substituição do óleo e filtro da caixa multiplicadora	24-01-2012	24-01-2012
M_preventiva	WTG06	Substituição do óleo e filtro da caixa multiplicadora	24-01-2012	24-01-2012
Inspeção	WTG03	Análise do óleo da caixa multiplicadora	27-01-2012	27-01-2012
M_corretiva	WTG04	Sem iluminação no elevador	14-05-2012	14-05-2012
M_corretiva	WTG04	Substituição de rolamentos da gearbox	22-02-2012	22-02-2012
M_corretiva	WTG07	Substituição de rolamentos da gearbox	23-02-2012	23-02-2012
M_preventiva	WTG04	Verificar/Alinhar gerador	29-02-2012	29-02-2012
M_preventiva	WTG07	Verificar/Alinhar gerador	29-02-2012	29-02-2012
Inspeção	WTG07	Relatório CMS: Increased vibration level at the spur gear (report-ID 002)	01-08-2011	29-02-2012
Inspeção	WTG05	Relatório CMS: Increased vibration level at the planetary stage 2 (report-ID 001)	01-08-2011	29-02-2012
Inspeção	WTG04	Relatório CMS: Increased vibration level at the sun 2 (report-ID 002)	01-08-2011	29-02-2012
Inspeção	WTG08	Inspeção da gearbox	27-02-2012	27-02-2012
M_corretiva	WTG04	Substituição do LPC	09-03-2012	09-03-2012
Inspeção	WTG08	Níveis de ferro, zinco e cobre elevados.	06-02-2012	12-03-2012
Inspeção	WTG07	Aumento dos níveis de cobre devido a desgaste	06-02-2012	12-03-2012
Inspeção	WTG02	Níveis normais	06-02-2012	12-03-2012
Inspeção	WTG05	Níveis de ferro, zinco e cobre elevados.	06-02-2012	12-03-2012
Inspeção	WTG01	Aumento dos níveis de ferro	06-02-2012	12-03-2012
Inspeção	WTG03	Aumento dos níveis de cobre devido a desgaste	06-02-2012	12-03-2012
Inspeção	WTG04	Valores registados podem ter sido influenciados pelo óleo anterior	06-02-2012	12-03-2012
Inspeção	WTG06	Valores registados podem ter sido influenciados pelo óleo anterior	06-02-2012	12-03-2012
M_preventiva	WTG07	Substituição do óleo da caixa multiplicadora	02-04-2012	02-04-2012
M_preventiva	WTG05	Substituição do óleo da caixa multiplicadora	02-04-2012	02-04-2012
M_corretiva	WTG07	Problemas de pitch	15-04-2012	16-04-2012
Inspeção	WTG08	High vibration behaviour on the main bearing	03-05-2012	15-05-2012
Inspeção	WTG07	High frequency amplitude of the Sun2 shaft run speed.	08-05-2012	15-05-2012
Inspeção	WTG05	Detetada contaminação com outro lubrificante	18-04-2012	15-05-2012
Inspeção	WTG07	Valores da análise dentro dos parâmetros normais	18-04-2012	15-05-2012